

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

探究精神獎

051814

看見聲音-聲音對皂膜影響之探討

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 張怡立	指導老師： 馮愛蓮 金佳龍
-------------------	-----------------------------

關鍵詞：聲音、皂膜

壹、摘要

本實驗在觀察不同頻率的聲波下，皂膜做上下振動所產生的波紋，皂膜顏色與厚度關係以及皂膜水平流動速率的變化。其中皂膜在不同自然頻率會產生特定的穩定上下振動波紋。而受聲波影響上下振動的皂膜會因慣性力和表面張力而有中心區和邊緣區內外的流動變化並產生漩渦狀的流動。在低頻率時，邊緣區向中心區的流動速率會大於中心區向邊緣區。高頻率時則相反。而在不同頻率時皂膜的流速變化則呈現一二項式向下的曲線。

貳、研究動機

聲音於日常生活中無處不在，卻未曾親眼所見。日前見有實驗使用沙粒在平板上受聲音影響產生克拉尼圖形，了解聲音在可以在物質上產生特定影響。本實驗欲利用流體皂膜觀察聲音產生時的皂膜所受的上下振動與水平流動之影響，並利用皂膜的特性去看到不同頻率下聲音的樣貌。

參、研究目的

- 一、探討頻率與皂膜上下振動之關係
- 二、探討皂膜顏色與厚度之關係
- 三、探討皂膜之上下振動與水平流動之關係

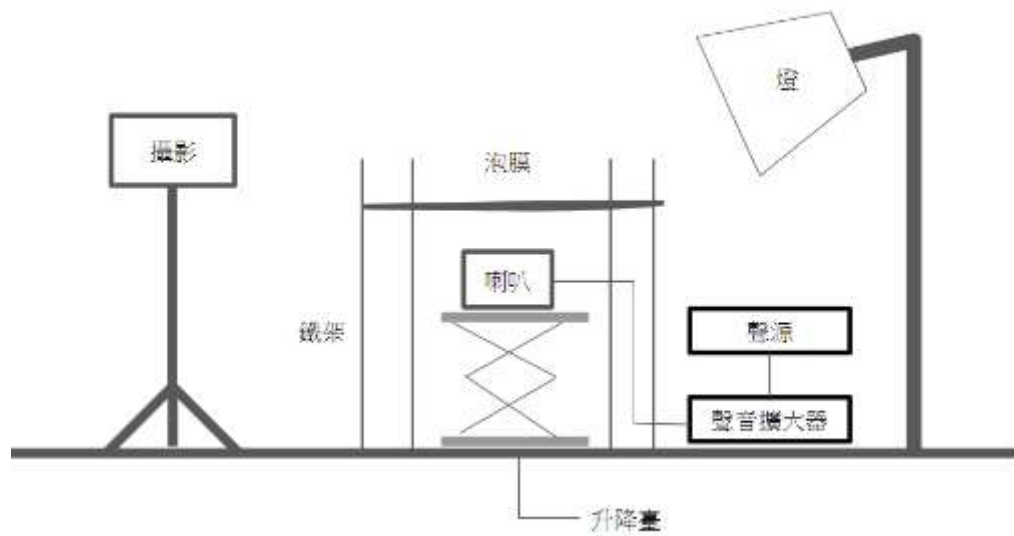
肆、研究過程與方法

一、實驗器材與設備

			
泡泡水	音響	肥皂框	聲音擴大器
			
MATLAB	Tracker	RDWorksV8	

表一、實驗器材與設備

二、實驗配置與流程



圖一、實驗器材配置圖



圖二、實驗流程圖

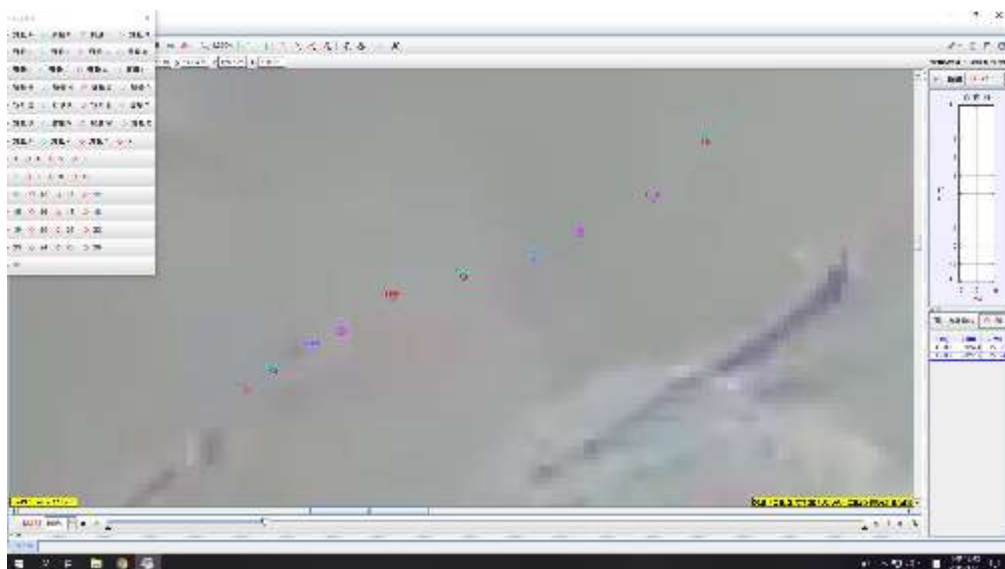
三、分析方法

(一)、上下共振駐波

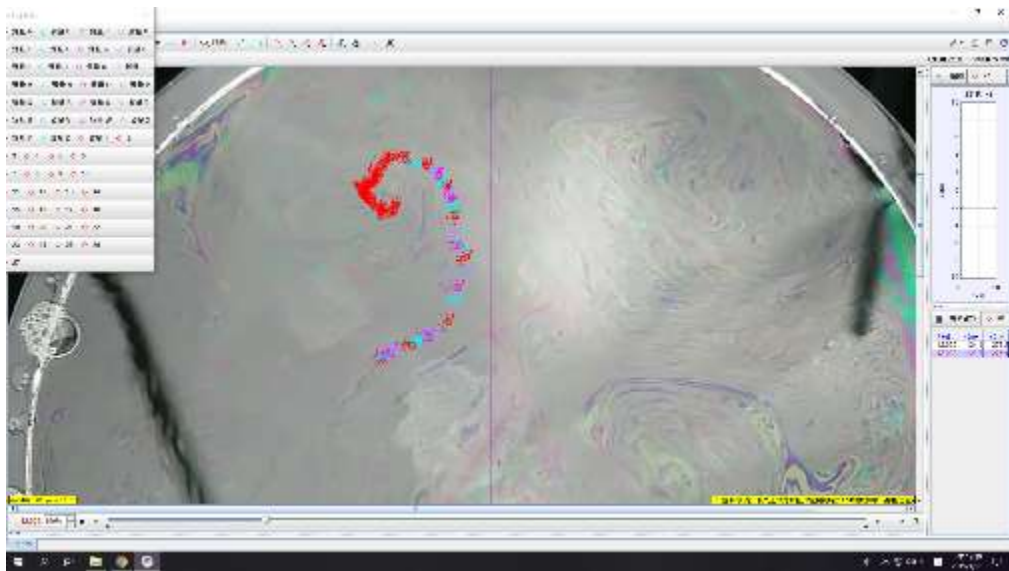
- 1.從 1Hz 開始，以 1Hz 為單位增加頻率找皂膜的自然頻率
- 2.鎖定自然頻率並以其之倍頻為實驗頻率開始記錄不同倍頻與上下振動波紋之關係。
 - (1) 用疊圖分析不同頻率下中心區（主要受聲波影響而上下振動產生波紋之區域）的面積。
 - (2) 用 960fps 慢速攝影及截圖分析中心區上下振動波紋之腹點的振幅
 - (3) 改變皂膜框形狀，分析邊界效應對

(二)、流速分析

- 1.錄影記錄皂膜。
- 2.觀察皂膜受振動影響產生的流動方式
- 4.分析各流動之流速。用 Tracker 追蹤皂膜上一焦點，每隔一影格（1/60 秒）抓一次，定義 xy 軸以立各點座標，將座標匯入 Excel 後利用兩點距離公式 $(|X1-X2|^2+|Y1-Y2|^2)^{1/2}$ 及速率公式 $(v=D/t)$ 計算出速率，最後製成折線圖。



圖三、每隔一個影格抓一次點示意圖

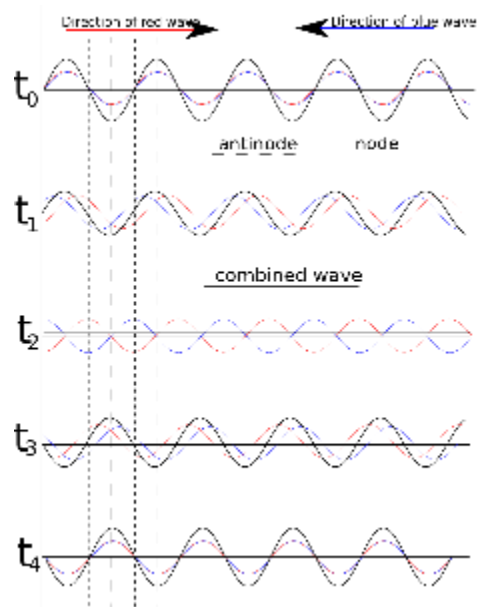


圖四、用 Tracker 追蹤觀察流動方向示意圖

四、研究原理

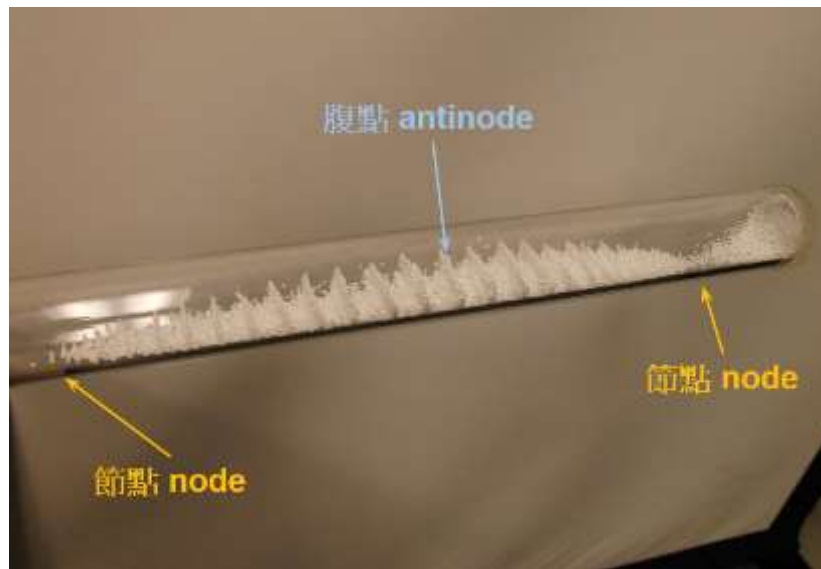
(一)、共振駐波

兩傳播方向相反，且振幅、頻率都相同的波相互干涉而成的合成波，即為駐波。



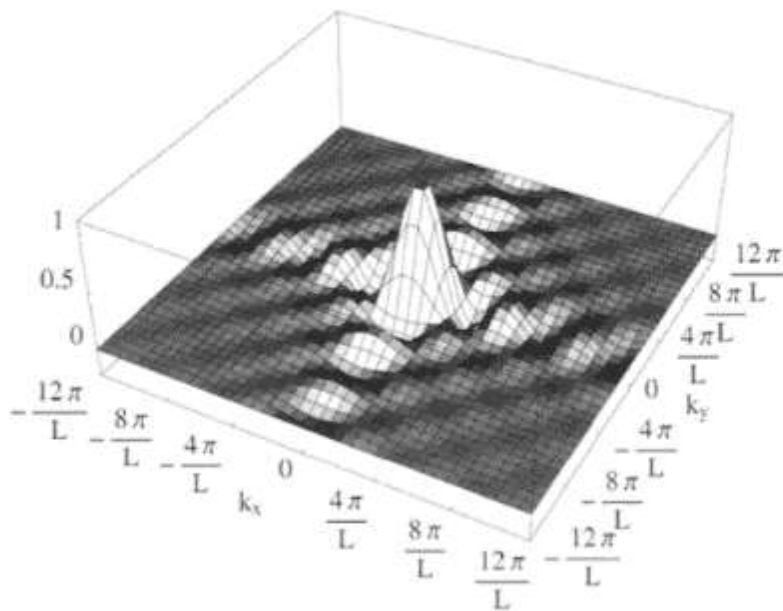
圖五、駐波示意圖

1.一維空間中的駐波

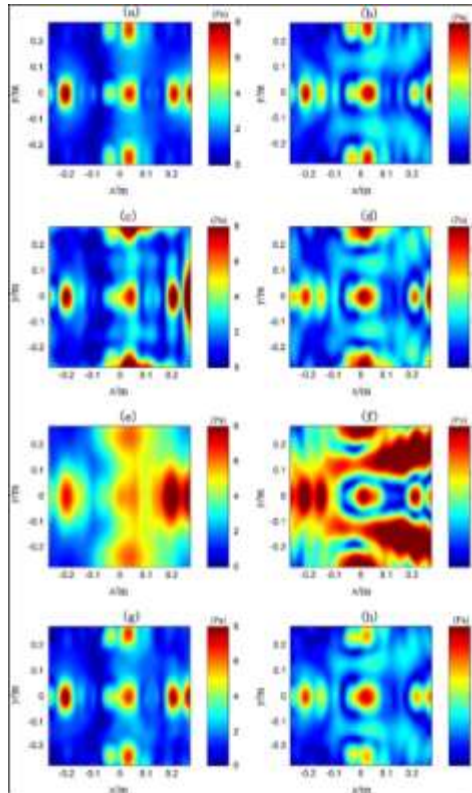


圖六、一維空間駐波產生的波漣示意圖

2.二維空間中兩非平行波相互干涉

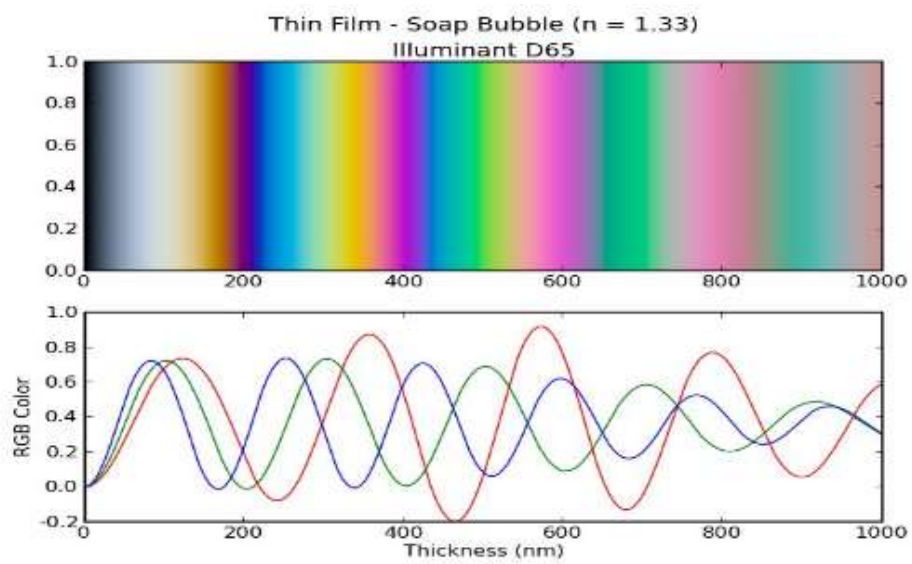


圖七、兩非平行的波相遇即會相長或相消干涉



圖八、聲場流動示意圖

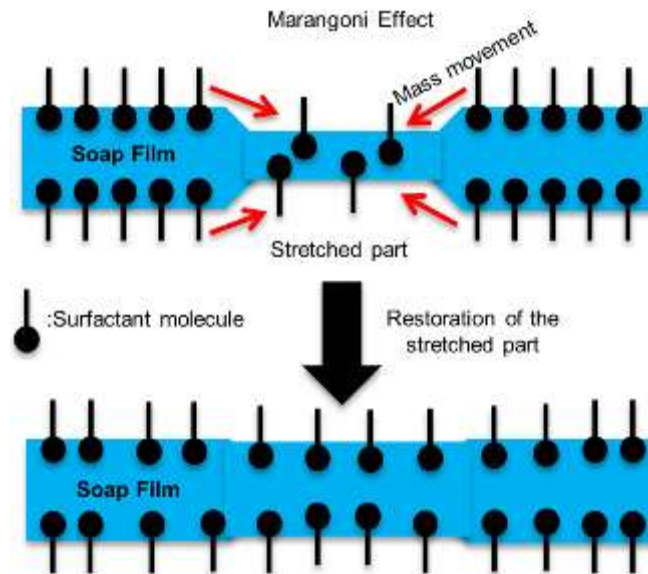
(二)、薄膜干涉



圖九、薄膜色彩與厚度之比較示意圖

(三)、馬拉高尼效應

較薄的肥皂膜濃度較低，表面張力增大，較厚濃度較大的肥皂膜向較薄處移動，欲使肥皂膜濃度平均。此一流動稱為馬拉高尼效應。








圖十、馬拉高尼效應示意圖


伍、研究結果

一、頻率和皂膜上下振動波紋

(一)、實驗結果顯示，不同頻率下，皂膜受到聲音影響會產生上下振動之波紋。其在自然頻率時皂膜會維持一穩定的波紋圖形，我們稱之為穩定態。在非自然頻率時，因皂膜無法共振而無法維持穩定波紋，我們稱之為非穩定態。而在自然頻率下，形成穩定態前會有一小段過渡期，我們稱之為啟動態。其波紋顯示方式雷同非穩定態。

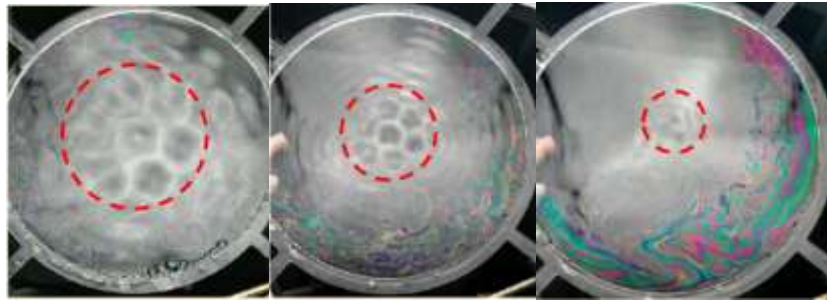
啟動態				
穩定態				
	13Hz 同心圓	36Hz 雙心	48Hz 四角心	57Hz 六角心

表二、啟動態和穩定態示意表。在不同的自然頻率下，皂膜的振動波紋會有所不同，即形成不同圖形的穩定態，而在穩定態前的

不穩定態 47 Hz				
------------------	--	--	--	--

表三、不穩定態示意表。由左而右為依時間順序上下振動波紋之改變。因最接近 48Hz，故較易形成 48Hz 的圖形。但其非自然頻率，故只能短暫形成穩定態時的圖形

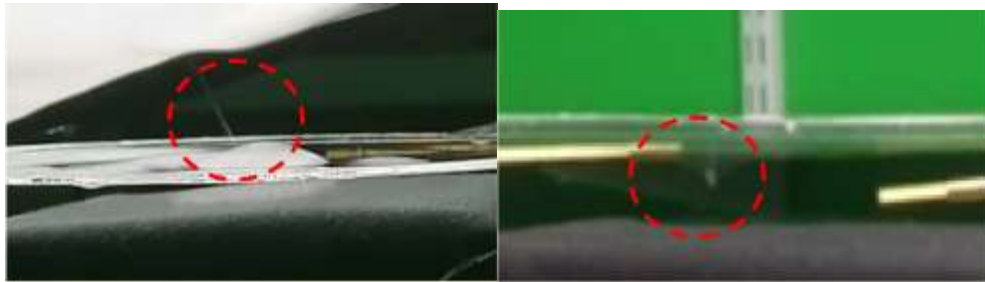
(二)、在穩定態的倍頻會看到其中心區域的面積縮小。



圖十一、頻率越高時皂膜的中心區域越小

(三)、皂水在上下振動時會於腹點排出

在上下振動時，由於腹點的慣性力會將皂水往腹點拉，因此皂水會由達到飽和的腹點處排出



圖十二、皂水由腹點向上即向下排出之示意圖

(四)、穩定態時，其中心區域的腹點皆為同相位。



圖十三、中心區域的腹點為同時上下振動




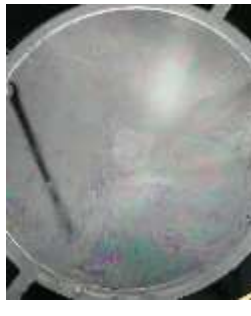
(五)、在中心區域之餘，邊緣區也有上下振動波紋，其為條狀排列



圖十四、中心區及邊緣區振動波紋排列示意圖

二、皂膜顏色與厚度關係

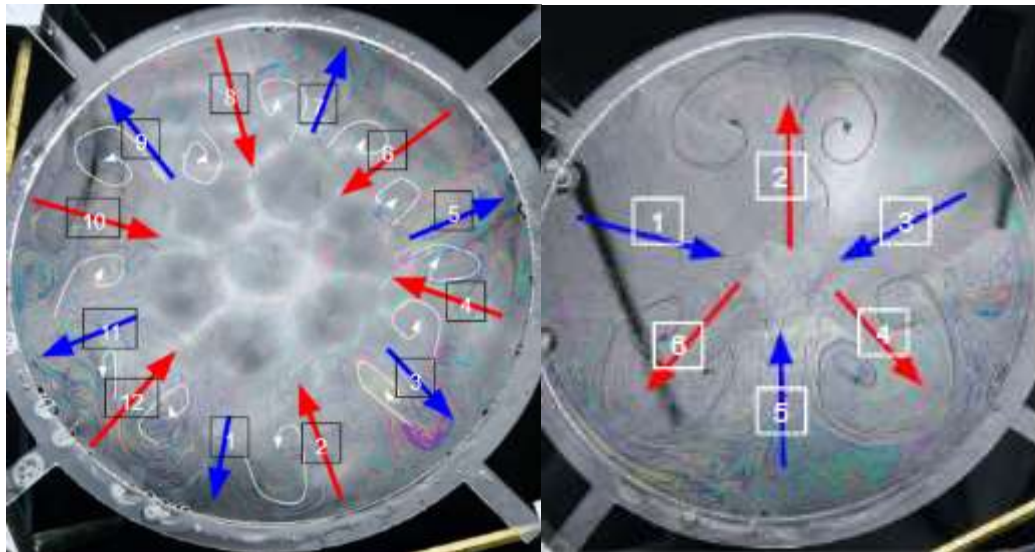
藉由薄膜干涉，觀察皂膜顏色可判斷皂膜之厚度，並發現在啟動聲波前，整個皂膜為平均厚，較無顏色，開啟聲波後，中心區(主要受聲波影響之主要範圍)腹點位置較無顏色代表比較厚，腹點間之縫隙則有顏色，表示厚度較薄，而邊緣區(較無受聲波影響之外圍區)則有明顯色彩，顯示出該區厚度較薄。

			
未啟動聲音前之皂膜	啟動聲音後之皂膜(57Hz)	啟動皂膜後之中心區域(57Hz)	啟動聲音後高頻之皂膜

表四、聲音與頻率對皂膜厚度影響比較表。未啟動聲音前皂膜顏色較均勻

三、上下振動與水平流動關係

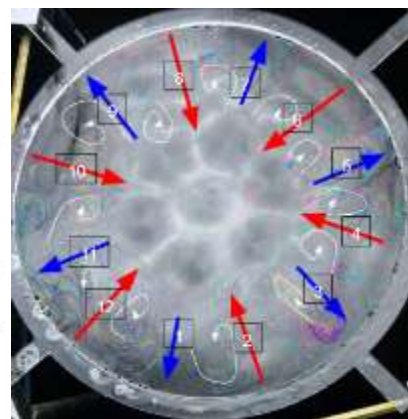
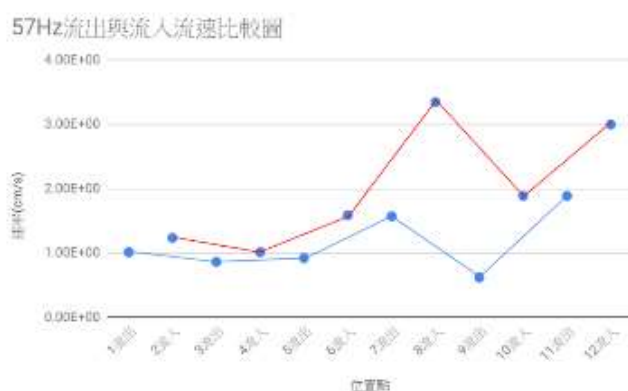
(一)、影響皂膜水平流動為一層層的圓駐波，而當高頻率時，皂膜的第一圈圓駐波(也就是中心區域)縮小，影響皂膜振動圖形即為第二圈圓駐波。



圖十五、左圖為低頻時圓駐波影響之流動示意圖。右圖為高頻時圓駐波影響之流動示意圖。

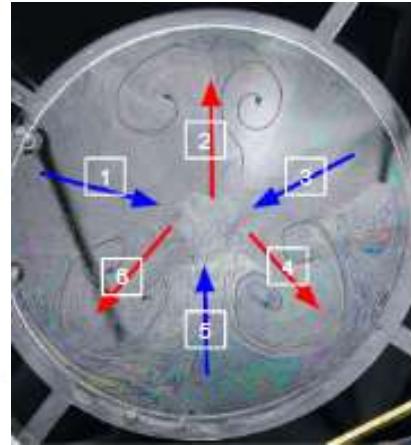
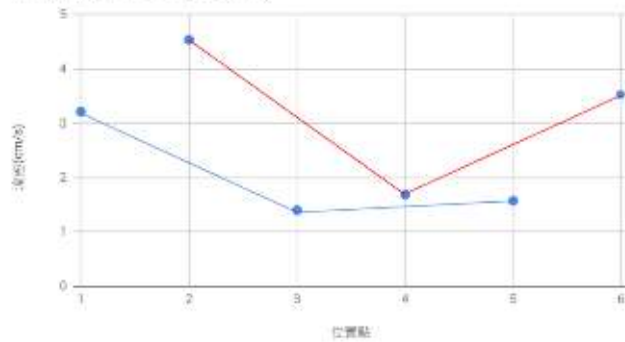
四、頻率與水平流速

(一)、在低頻有上下振動時，可見渦流從皂膜中心流入的速度大於流出，而在高頻不見上下振動圖形之皂膜，其渦流從皂膜中心流出的速度大於流入



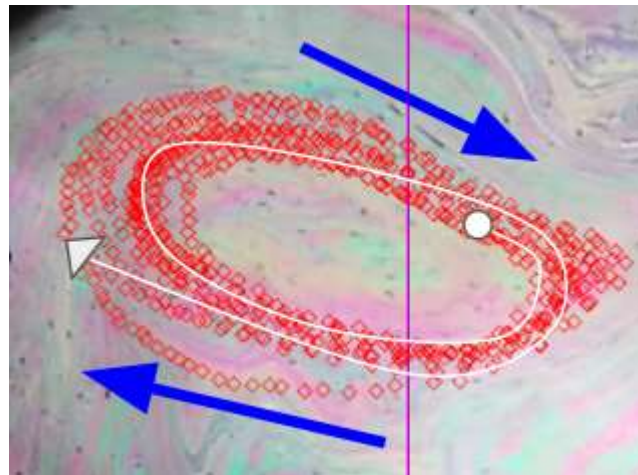
表五、有振動之流速變化表。紅色圈為皂膜從邊緣區向內流入速率。

741Hz流出流入速度變化表

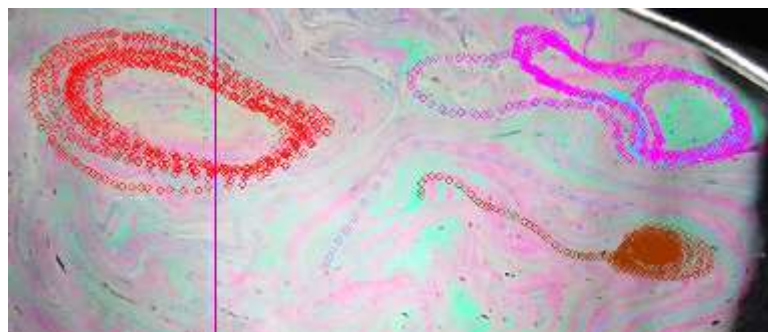


表六、無振動之流速變化表。紅色圈為皂膜從中心區向外流出速率。

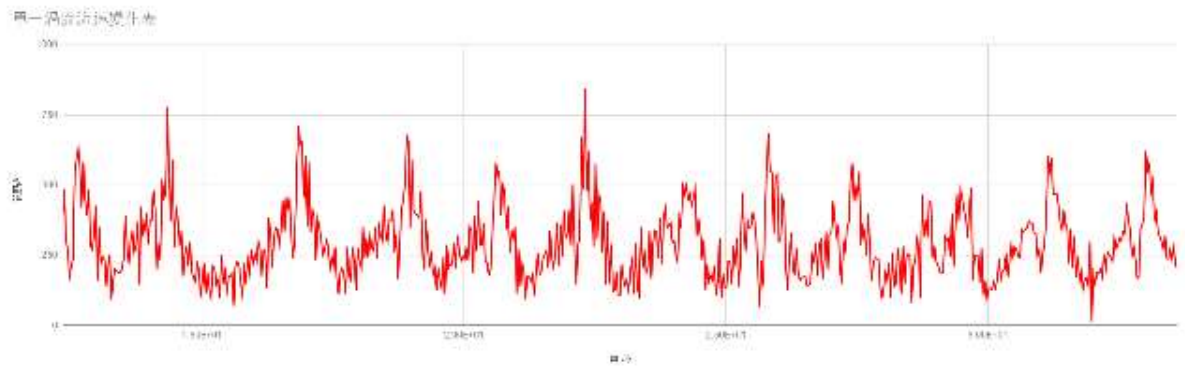
(二)、分析單一頻率下一渦流的流速變化，發現其越向內圈速率越慢，且在每一圈都有之快慢的不同。



圖十六、單一渦流流向示意圖。白色箭頭圍渦流流向，藍色箭頭為流速較快處

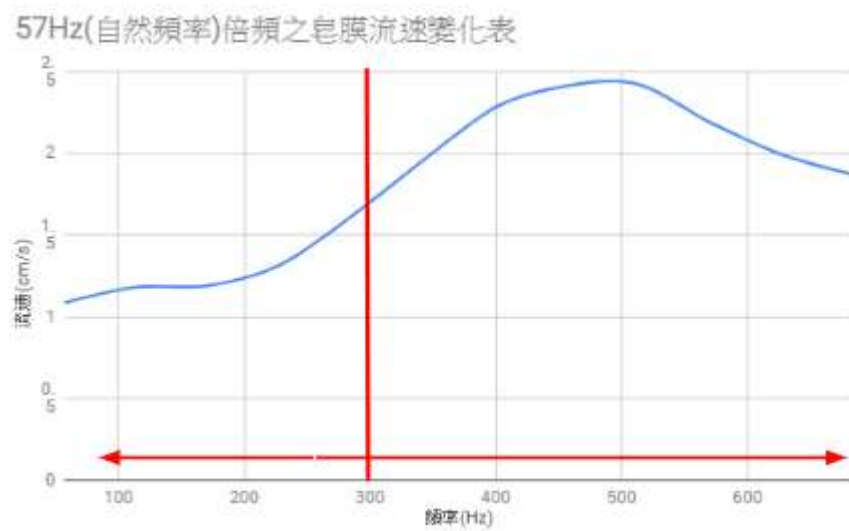


圖十七、渦流位置示意圖



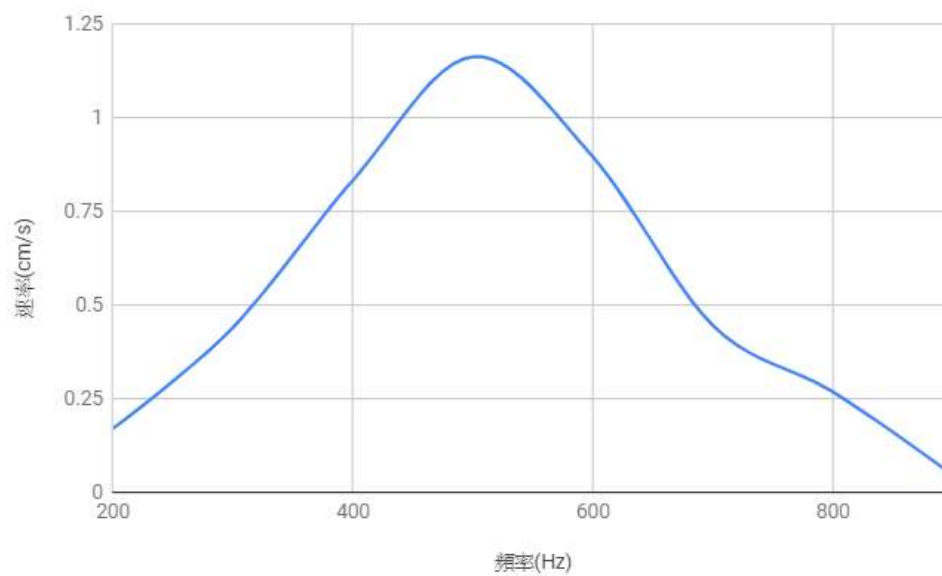
表七、單一頻率不同渦流流速變化表

(三)、以 57Hz(自然頻率)作為基礎觀察其倍頻之流速狀況，發現在約莫 300Hz 時變無法輕易觀察皂膜上下振動。且在邊緣區的渦流數變少。



表八、57 倍頻(自然頻率)流速變化表

(四)、實驗結果顯示，在高頻時，水平流速與頻率大約呈現開口朝下之二次函數，其最大值於頻率約為 500Hz



表九、高頻率流速變化表

陸、討論

一、頻率與皂膜上下振動波紋

(一)、膜態

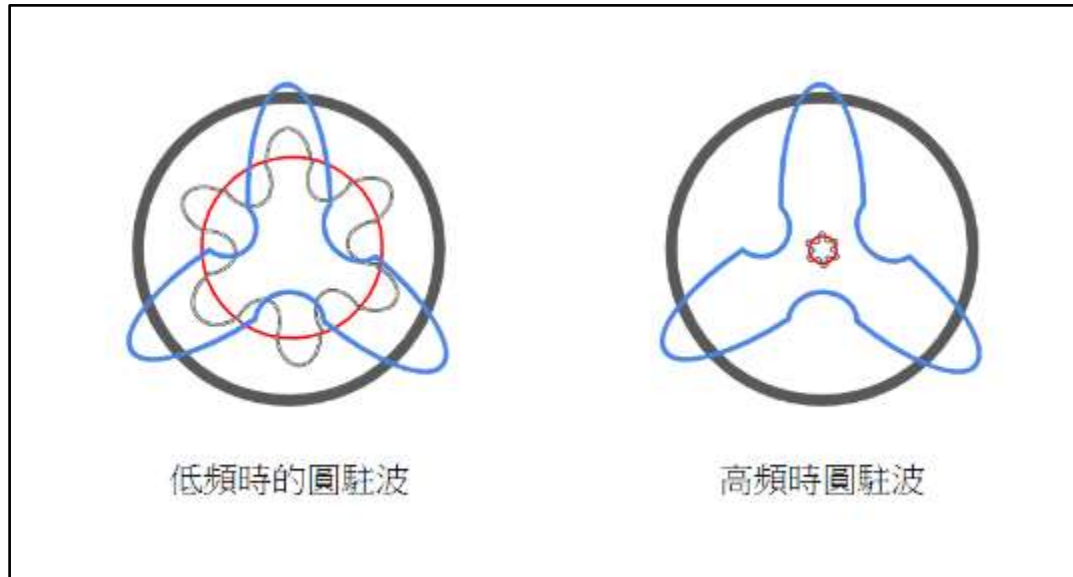
皂膜在聲音的影響下會產生上下振動圖形。對於不同頻率下產生穩定態與不穩定態是因為皂膜的自然頻率使其產生穩定上下振動波紋，且不同自然頻率會產生不一樣的穩定態。啟動態和不穩定態展現了皂膜的自我適應性，也就是皂膜會嘗試形成最穩定的狀態。

(二)、中心區

在穩定態的倍頻時中心區之面積會縮小是因為高頻率時波長會變小。而受到振動的皂膜為多層的共振駐波，當第一圈縮小之後影響皂膜圖形的即為共振駐波的第二圈



圖十八、多層圓駐波分解示意圖



圖十九、高低頻皂膜時的圓駐波比較圖。紅色為前面所提及的中心區域，即為第一圈圓駐波。而高頻時中心區域會縮小。

二、上下振動與水平流動

(一)、低頻率時（有上下振動波紋）

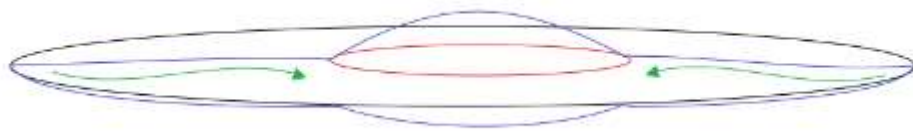
因為低頻率需要較厚的皂膜，因此藉由顏色與厚度可以發現中心區厚度較邊緣區厚，且由水平流動可發現從邊緣區流向中心區之流速大於流出中心區的速率。由此顯示低頻率的聲波讓上下振動的中心區吸收邊緣區的皂水而變厚

(二)、高頻率時（無上下振動波紋）

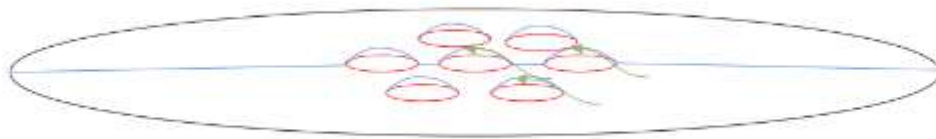
因為高頻率需要較薄的皂膜，因此藉由顏色與厚度可以發現皂膜變薄，且由水平流動可發現從邊緣流入中間之流速大於流入中間的流速。由此顯示高頻率聲波讓中間排水而使皂膜變薄。



圖二十、啟動聲波前皂膜為均厚



圖二十一、啟動聲波後，中心區因告訴上下振動而瞬間變厚



圖二十二、低頻率皂膜因慣性立造成流動之示意圖

三、頻率與厚度

受較高頻率聲波作用之皂膜的厚度會比受較低頻率聲波作用的皂膜薄，這是因為頻率較高的聲波須由輕薄且高速振動質體形成，所以頻率越高，皂膜自我適應性使其厚度越薄。由此顯示，因為皂膜自我適應性，使平常是因物質的厚薄與振動頻率產生不同頻率之聲波變成不同頻率之聲波可使皂膜產生不同狀態。而藉由皂膜的狀態也能反推出聲波的樣貌。

四、頻率與水平流動

(一)、渦流

由於皂膜中間與外圍的一進一出，皂水為了使移動路徑縮短，便形成渦流。低頻率時（形成中心區），由於吸入中心區之速率較快，渦流中向中心區流之路線速率較快，其餘較慢；而高頻率則相反，渦流中流向邊框的速率較快，其餘則較慢。

(二)、流速

頻率越高，皂膜越薄，振動速度越快使流動速率也越快，到了 500Hz 時，由於到達了皂膜的臨界值，因此速率便開始下降。

柒、結論

- 一、皂膜的自我適應性使其在自然頻率與非自然頻率分別產生穩定態與非穩定態。
- 二、由於頻率越高，聲音的波長越短，故中心區域會縮小。
- 三、中心區上下振動的慣性力和向下的重力使皂水從中心區之腹點向上向下滴出。
- 四、受聲波影響而形成之中心區會因上下振動吸取邊緣區皂水而變厚，邊緣區則變薄。到高頻時則由中間排水置外圍，使皂膜變薄。
- 五、皂膜的自我適應性使我們可利用其表現行為推測出聲波的樣貌。
- 六、皂膜在受不同頻率聲波擾動下，會產生渦旋狀之流動，且受到吸力與推力，使一個渦旋中的速率會不同。

捌、參考資料

- 一、Bubble film with vortex。2016 年臺灣國際科導教師：張良肇、馮愛蓮。
- 二、膜上的波扭。中華民國第 49 屆中小學科學展覽會。作者：呂伊庭、鄭惟允、洪家琪。指導老師：吳原旭、林慶豪
- 三、利用共振駐波移動平面上的微小物體。臺北市立麗山高級中學 105 學年度學生校內科學展覽。作者：鄭欣儒、洪錦彤。指導教師：金佳龍。
- 四、波動奇蹟—皂膜與皂水共振模式之研究。台灣二 00 五年國際科學展覽會。作者：國立新竹高級中學郭博鈞。
- 五、膜上的波扭。中華民國第 49 屆中小學科學展覽會高中組物理科。作者：呂伊庭、鄭惟允、洪家琪。指導老師：吳原旭、林慶豪。
- 六、Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography.Earl G. Williams.
- 七、馬拉高尼效應與肥皂泡接近之機制。作者：袁芷芸、蕭佩宛。市立惠文高中。指導老師：張小琪。
- 八、Practical Chemistry of Long-Lasting Bubbles

【評語】 051814

本實驗探討聲波與肥皂膜間耦合的現象，特別是觀察不同頻率的聲波下，皂膜做上下振動所產生的波紋，皂膜顏色與厚度關係以及皂膜水平流動速率的變化，是一項認真探索的作品。但是其實已經有很多類似的實驗（如 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01487166>）將聲音透過與肥皂膜間耦合，讓聲音可以被「看見」。本實驗主要是觀察自然頻率與非自然頻率所產生的穩定態與非穩定態，比較欠缺原理理論上的分析，降低了本身的科學性。

壹、摘要

本實驗利用皂膜為觀察不同頻率下，皂膜振動所產生的波紋，皂膜水平流動速率以及皂膜振動運動與水平流動之關係。其中皂膜會依照特定共振頻率產生特定穩定振動波紋的穩定態；非共振頻率時則維持不穩定態並試圖形成穩定態，此顯示了皂膜之自我適應性。在非穩態時，水平流速與頻率大約呈現開口朝下之二次函數圖形。

貳、研究目的

- 一、探討頻率與皂膜振動波紋現象變化
- 二、探討皂膜顏色與皂膜厚度之關係
- 三、探討皂膜振動與水平流動之關係

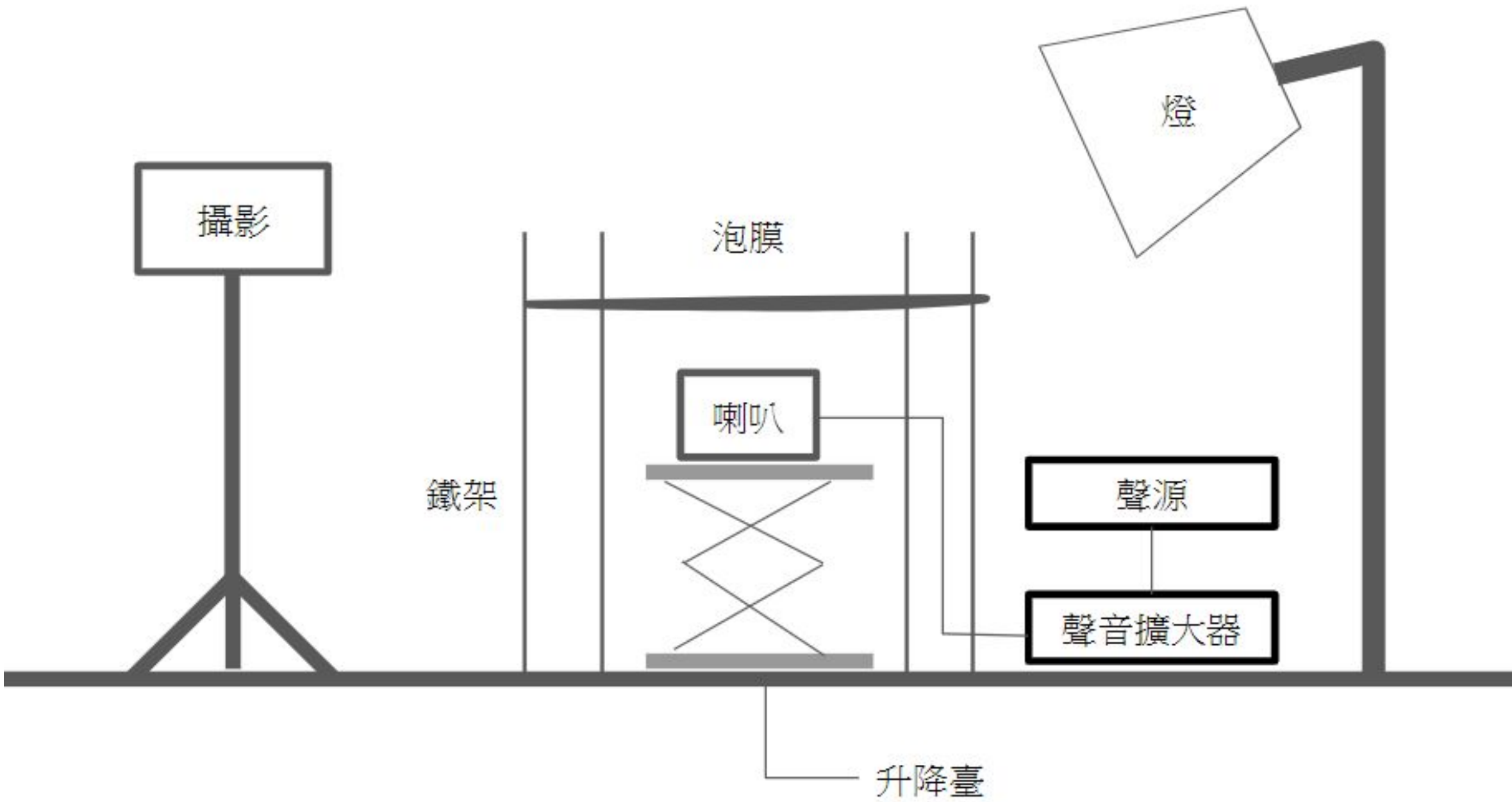
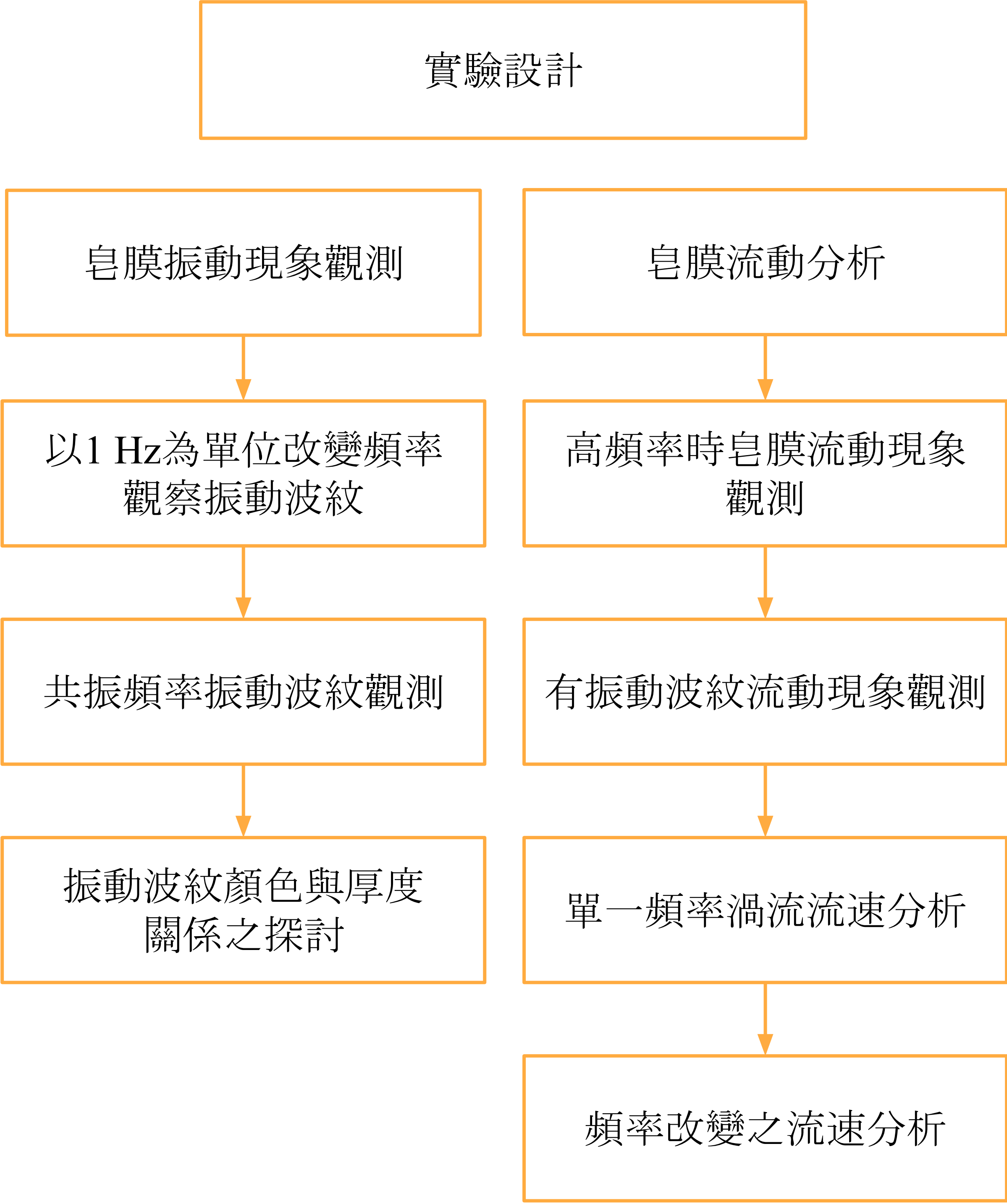
參、研究過程及方法

一、實驗與分析方法

表一、實驗器材表

		
音響	聲音擴大器	肥皂膜
		
Tracker	RDWorksV8	MATLAB

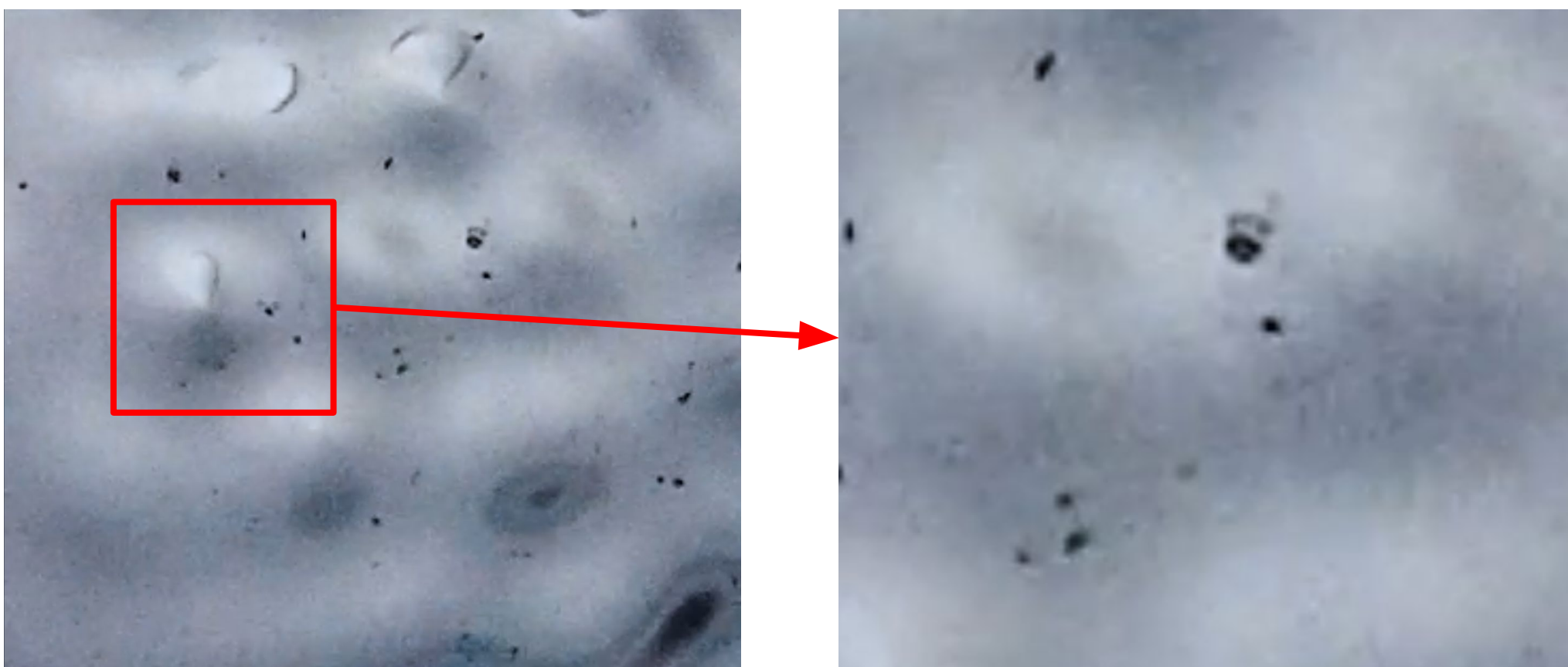
表二、實驗流程表



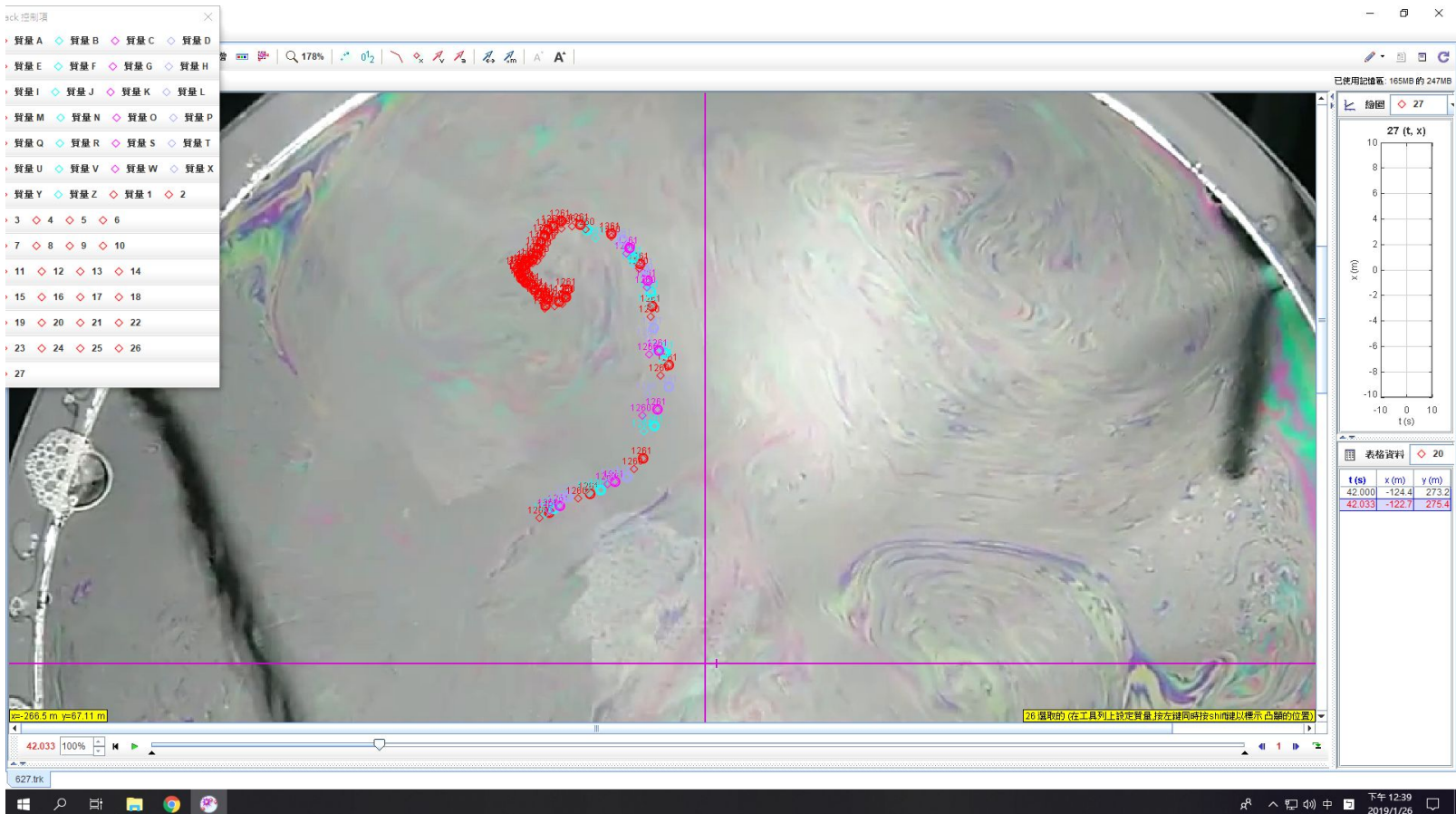
圖一、實驗架設圖

二、水平流速追蹤

- (一)、錄影記錄皂膜。
- (二)、觀察中心區振動波紋腹點間流動方式。
- (三)、觀察邊緣區(較無受聲波影響而未產生振動波紋之外圍區域)流動方式。
- (四)、分析各流動之流速。



圖三、追蹤之膠狀物質示意圖

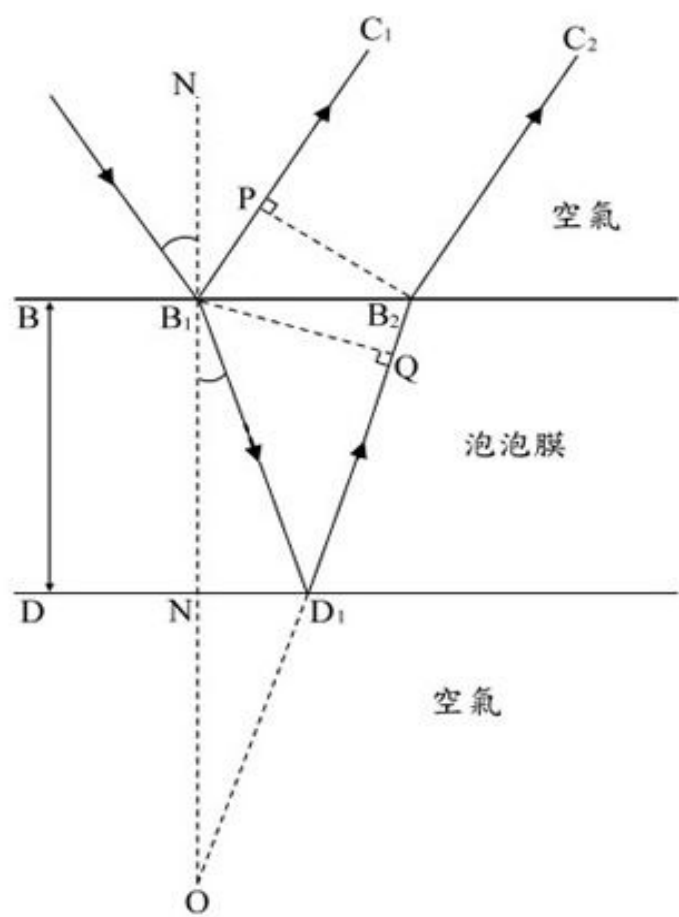


圖二、利用Tracker追蹤觀察流動方向示意圖

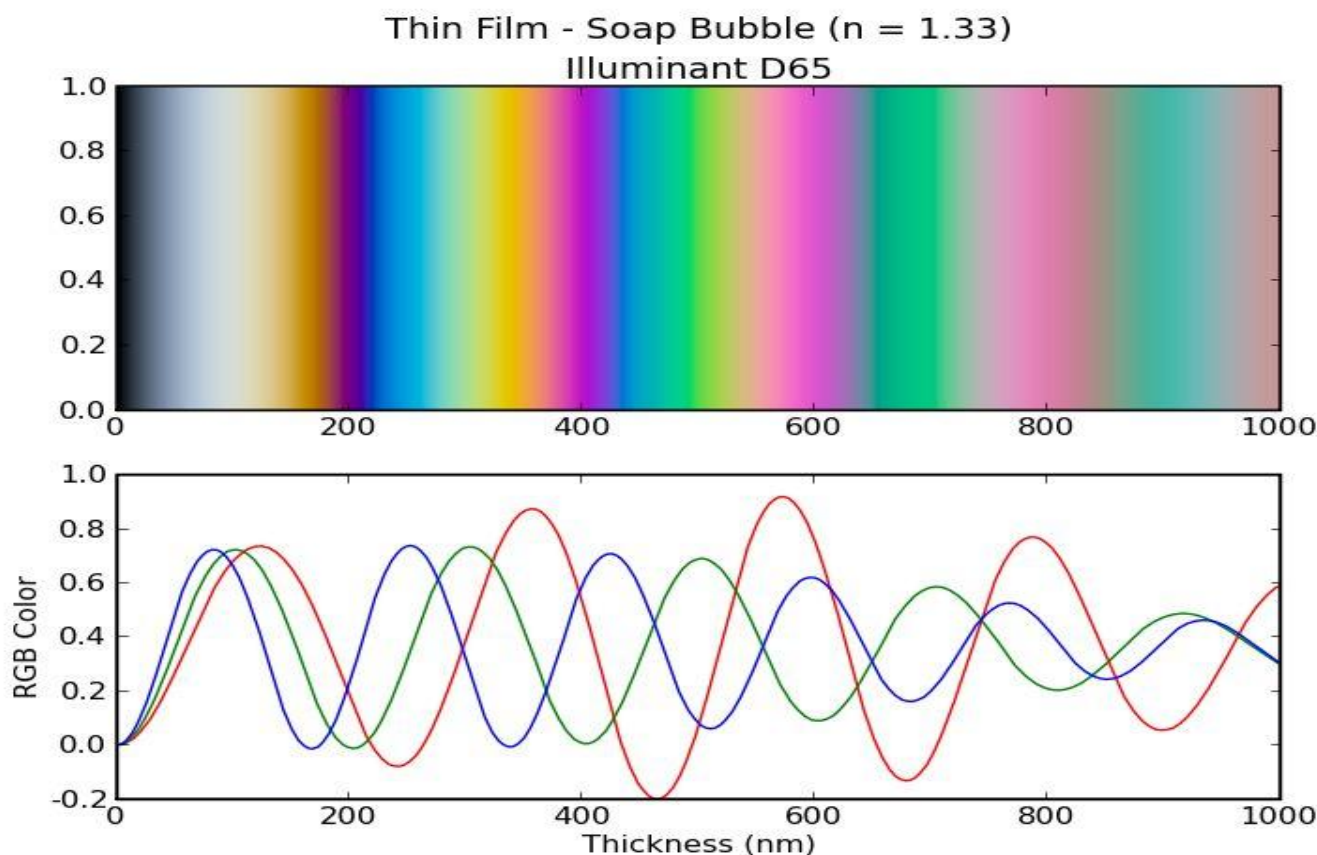
三、實驗原理

(一)、薄膜干涉原理

由於薄膜厚度不同會影響折射角度而改變其呈現之顏色，所以可藉由薄膜干涉之顏色判斷皂膜厚度。



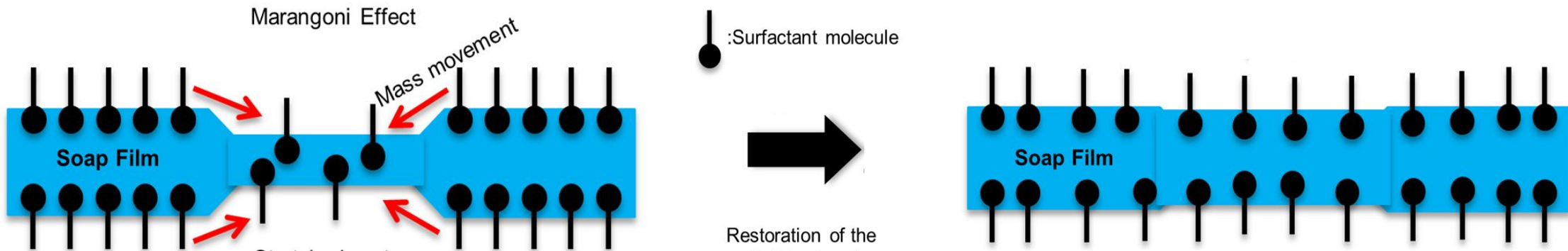
圖四、薄膜干涉之示意圖



圖五、薄膜色彩與厚度之比較圖

(二)、馬拉高尼效應

較薄的肥皂膜濃度較低，表面張力增大，較厚濃度較大的皂膜向較薄處移動，欲使皂膜濃度平均。此一流動稱為馬拉高尼效應。



圖六、馬拉高尼效應示意圖

(三)、驅動方程式

影響皂膜振動之力即為聲音的驅動力 and 阻力和恢復力之合力。

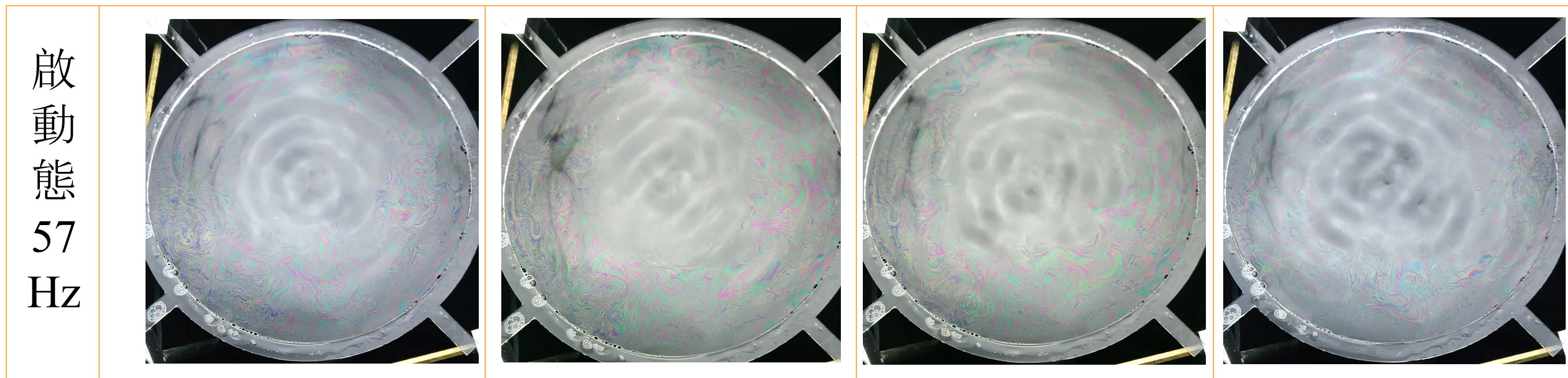
$$F_d \cos \omega_d t = m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx$$

肆、研究結果

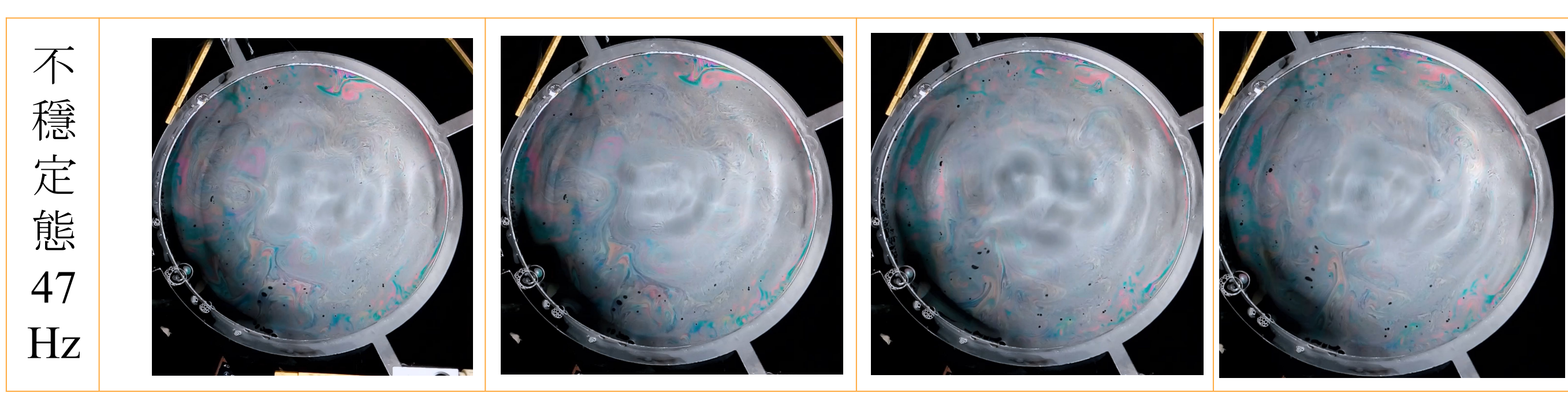
一、頻率與振動波紋之關係

(一)、實驗結果顯示，不同頻率下，皂膜會維持在非穩定態並試圖形成穩定波紋。或先出現同心圓、雙心和四角心此過程稱為啟動態，經過啟動態後則呈現穩定波紋，稱為穩定態。

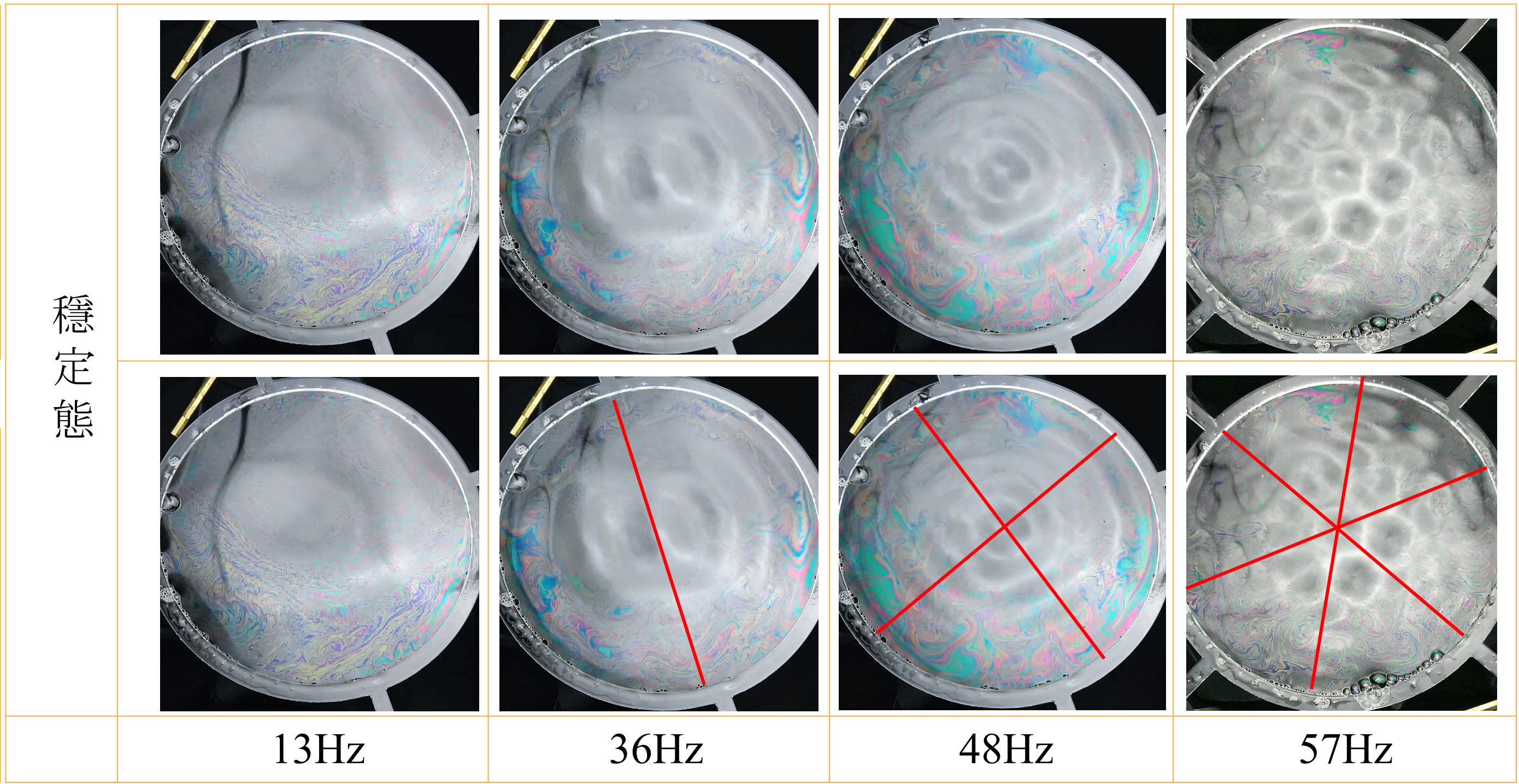
表三、啟動態隨時間變化表



表四、不穩定隨時間變化表

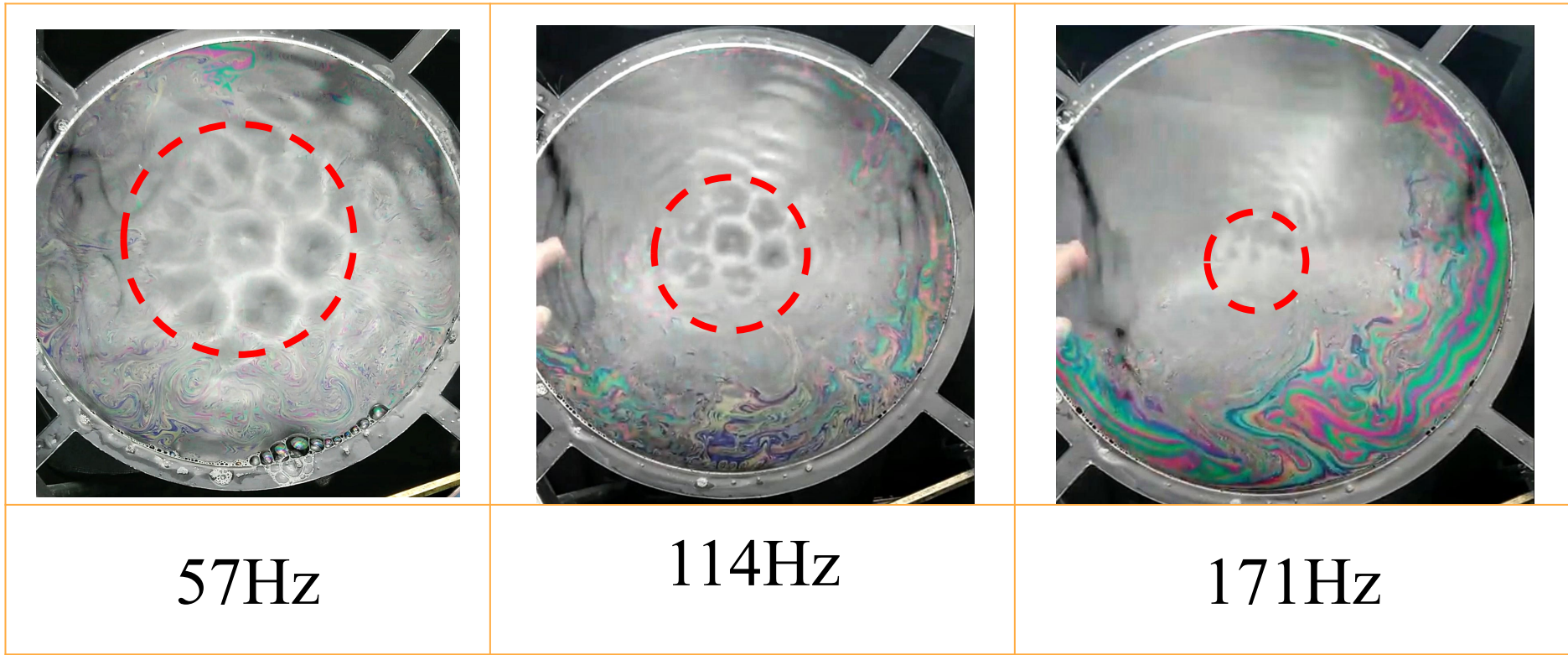


表五、不同共振頻率振動波紋表



(二)、在穩定態的倍頻會看到其中心區域的面積縮小

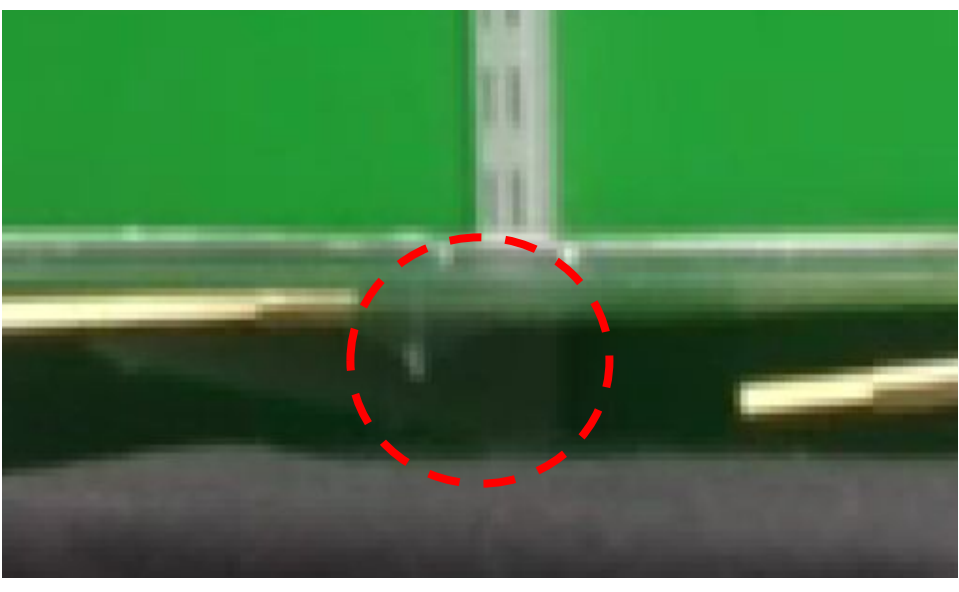
表五、穩定態倍頻比較表



(三)、上下振動之皂膜會隨著電動而向上噴出及向下滴落



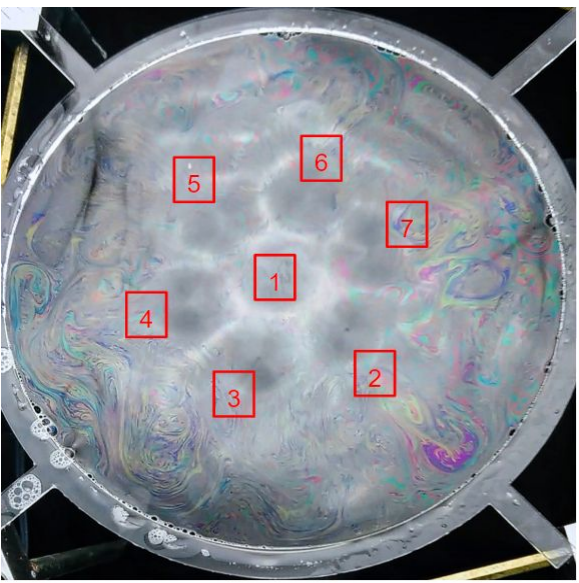
圖七、皂水向上噴出



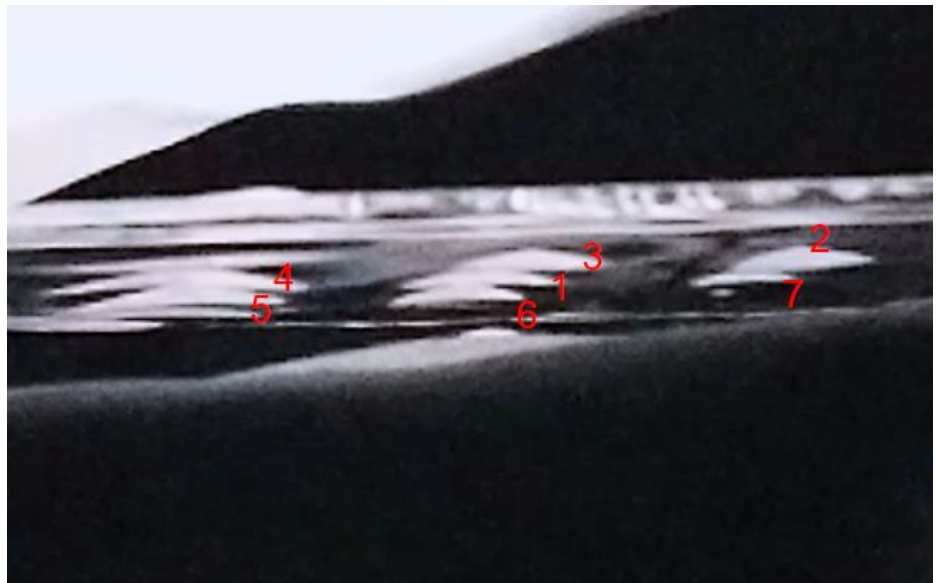
圖八、皂水向下滴落

(四)、振幅

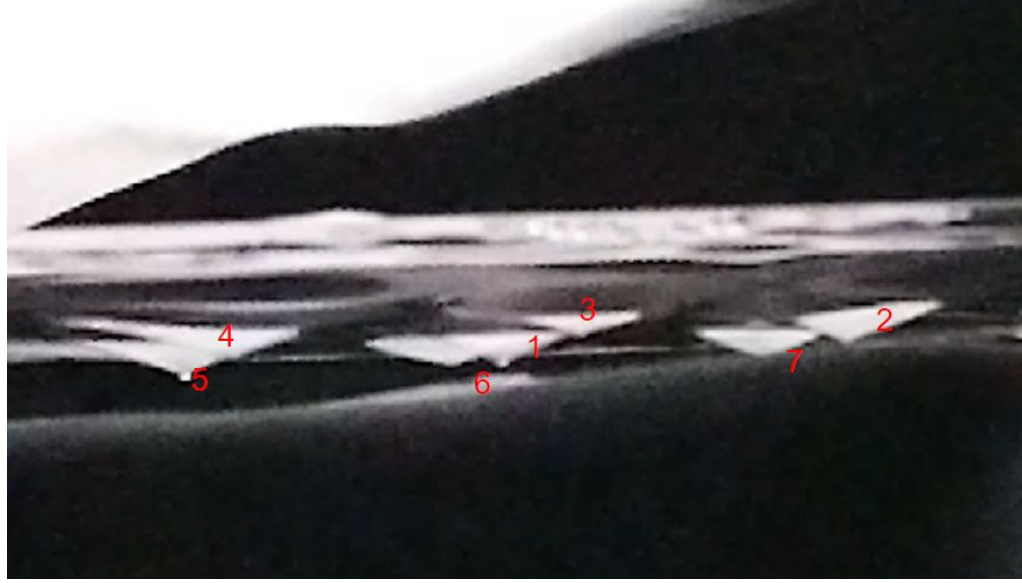
1.在實驗時從側面拍攝觀察，發現在共振頻率時的上下振動波紋之不同的腹點會同時向上和同時向下。



圖九、俯視圖



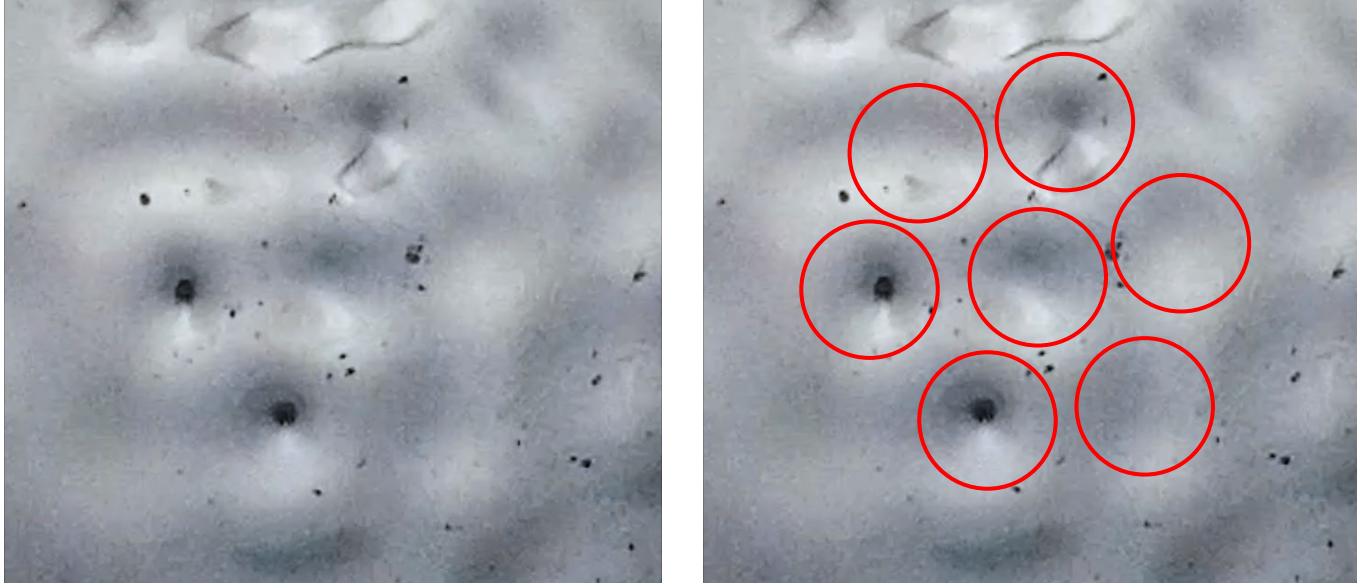
圖十、側視圖 - 腹點向上



圖十一、側視圖 - 腹點向下



圖十二、俯視腹點向上

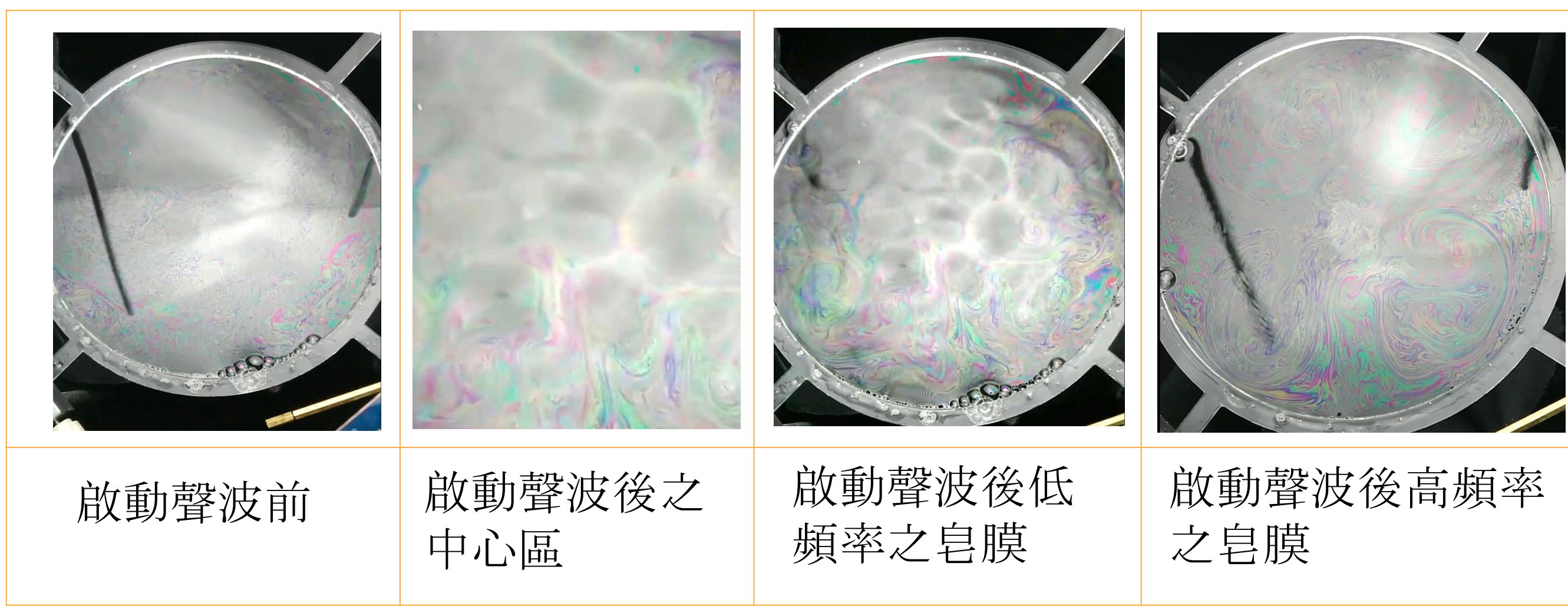


圖十三、俯視腹點向下

二、顏色與厚度

(一)、藉由薄膜干涉，觀察皂膜顏色可判斷皂膜之厚度，並發現在啟動聲波前，整個皂膜為平均厚，較無顏色，開啟聲波後，中心區(主要受聲波影響之主要範圍)腹點位置較無顏色代表比較厚，腹點間之縫隙則有顏色，表示厚度較薄，而邊緣區(較無受聲波影響之外圍區)則有明顯色彩，顯示出該區厚度較薄。

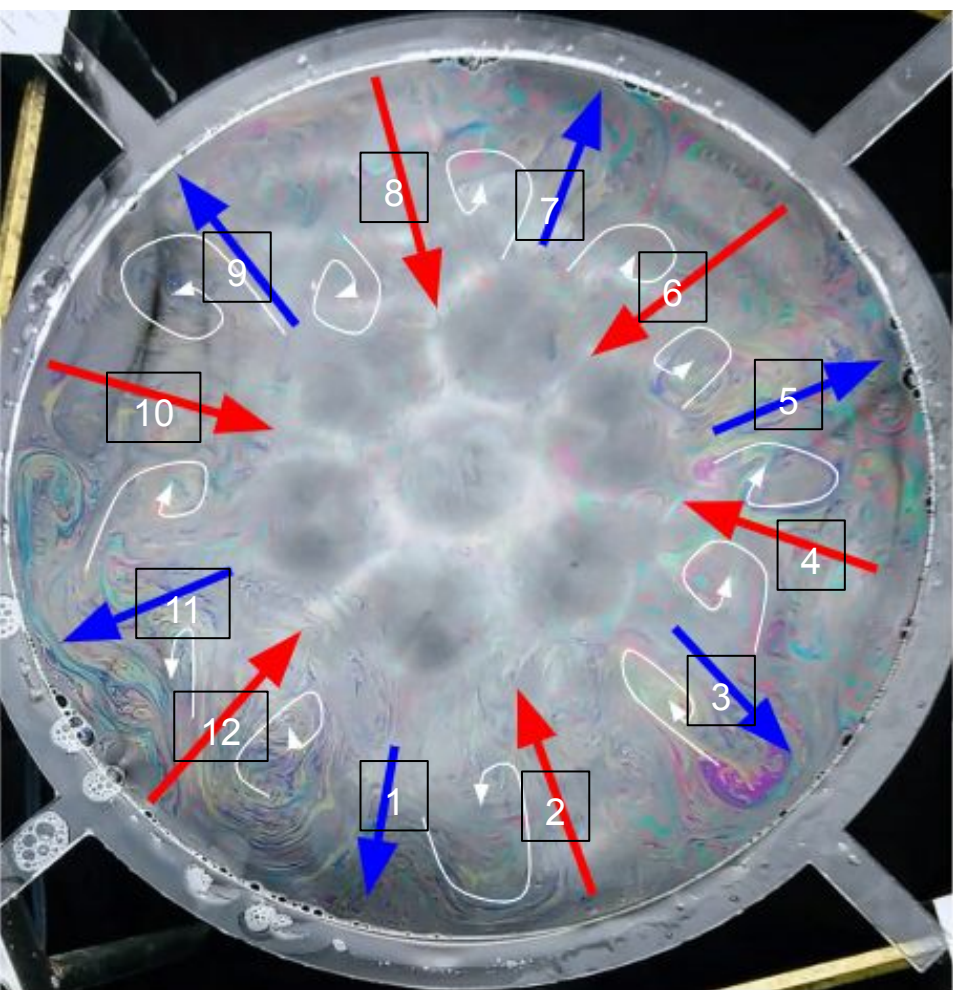
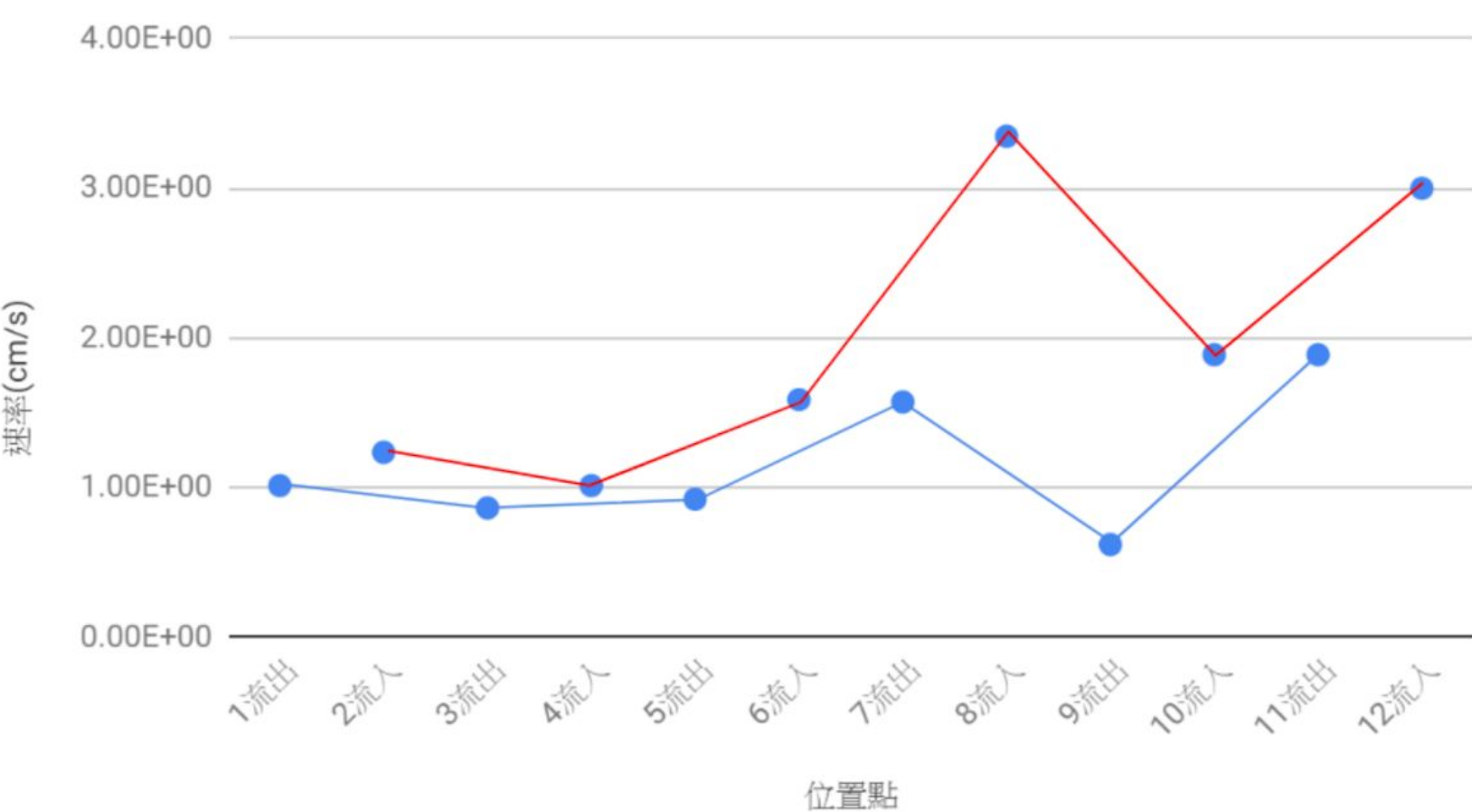
表六、穩定態倍頻比較表



三、上下振動與水平流動之關係

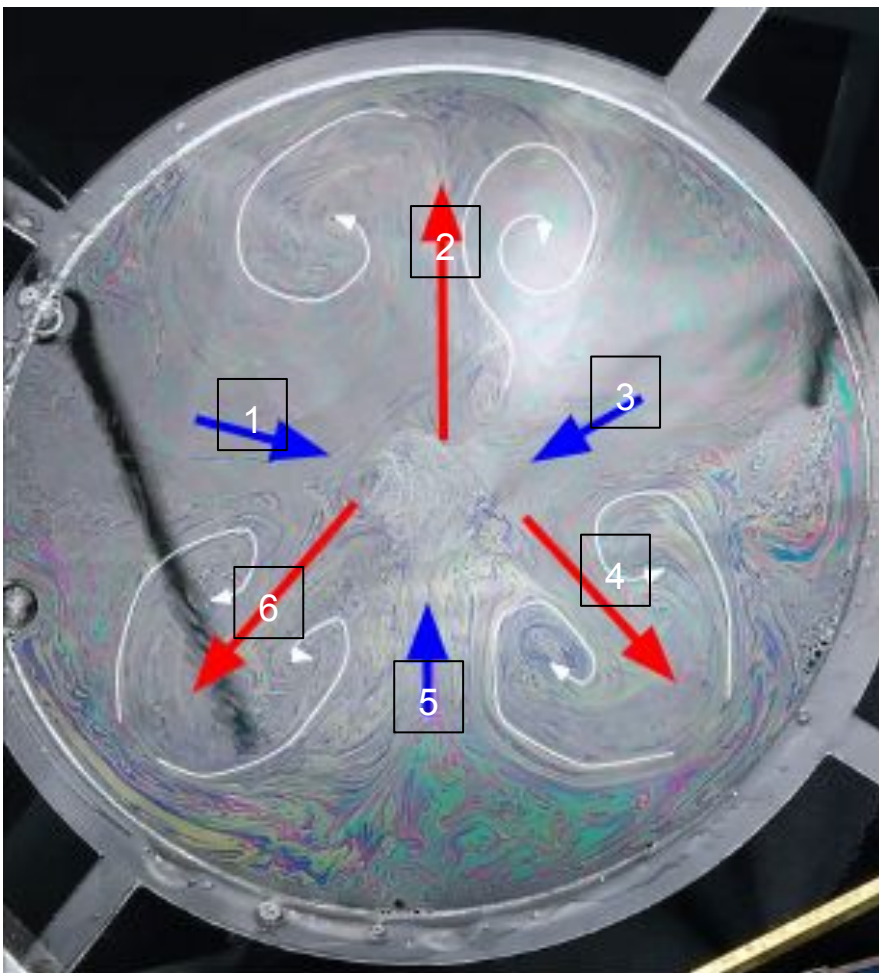
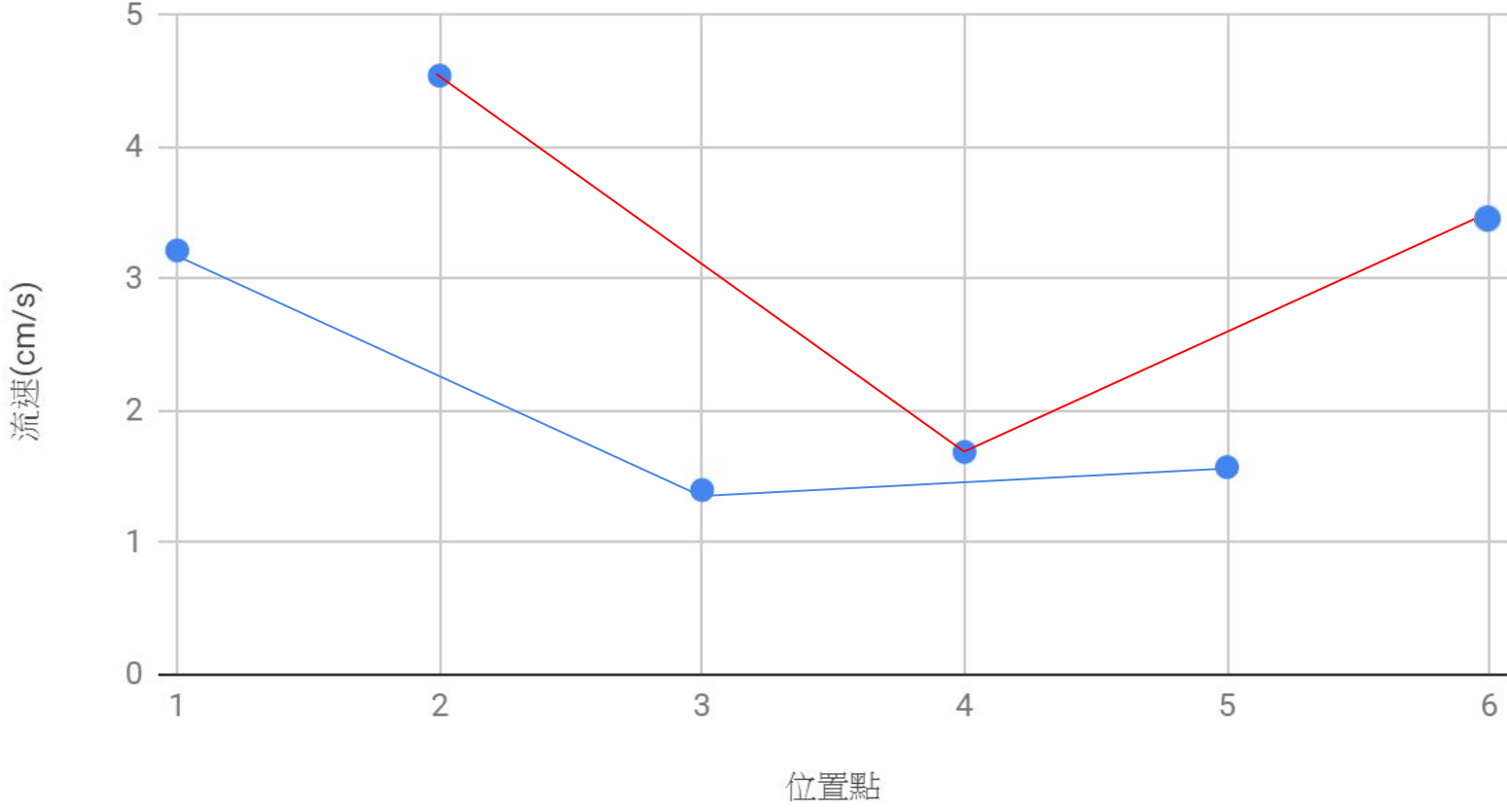
(一)、影響皂膜水平流動為一層層的圓駐波，而當高頻率時，皂膜的第一圈圓駐波(也就是中心區域)縮小，影響皂膜振動圖形即為第二圈圓駐波。在低頻有上下振動時，可見渦流從皂膜中心流入的速度大於流出，而在高頻不見上下振動圖形之皂膜，其渦流從皂膜中心流出的速度大於流入。

57Hz流出與流入流速比較圖



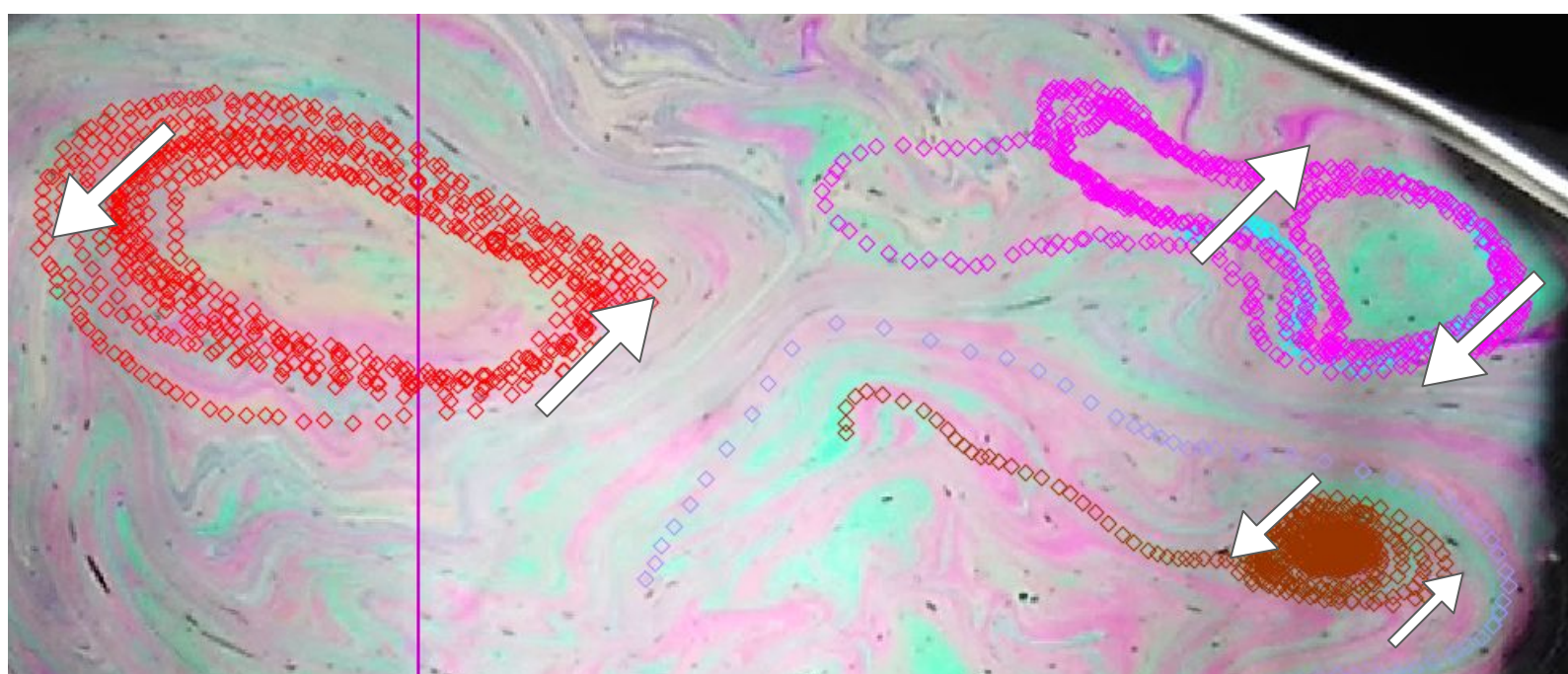
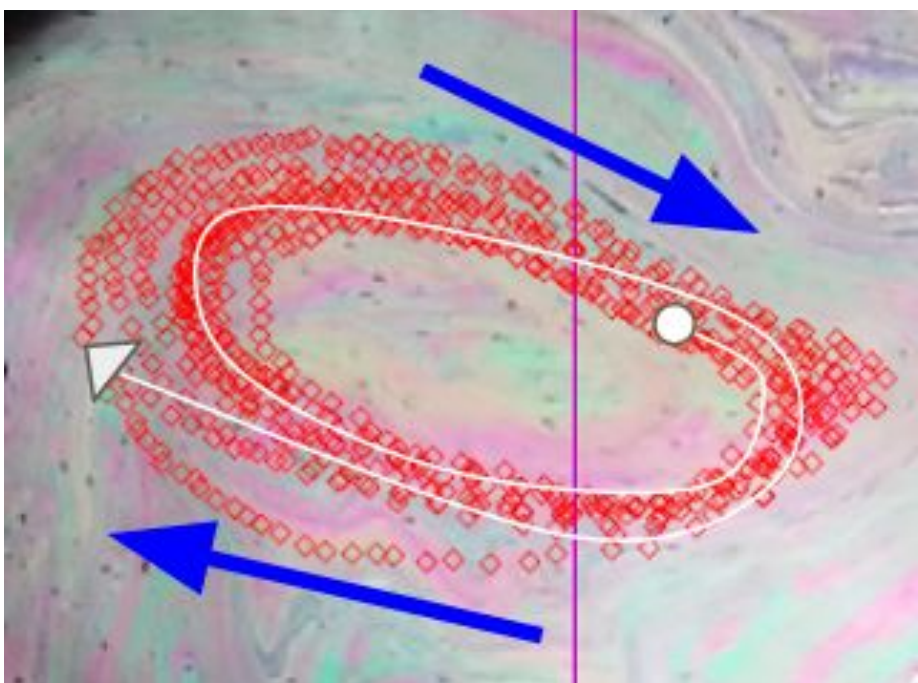
圖十四、低頻率時中心區與邊緣區流動之流速比較

741Hz流出流入速度變化圖

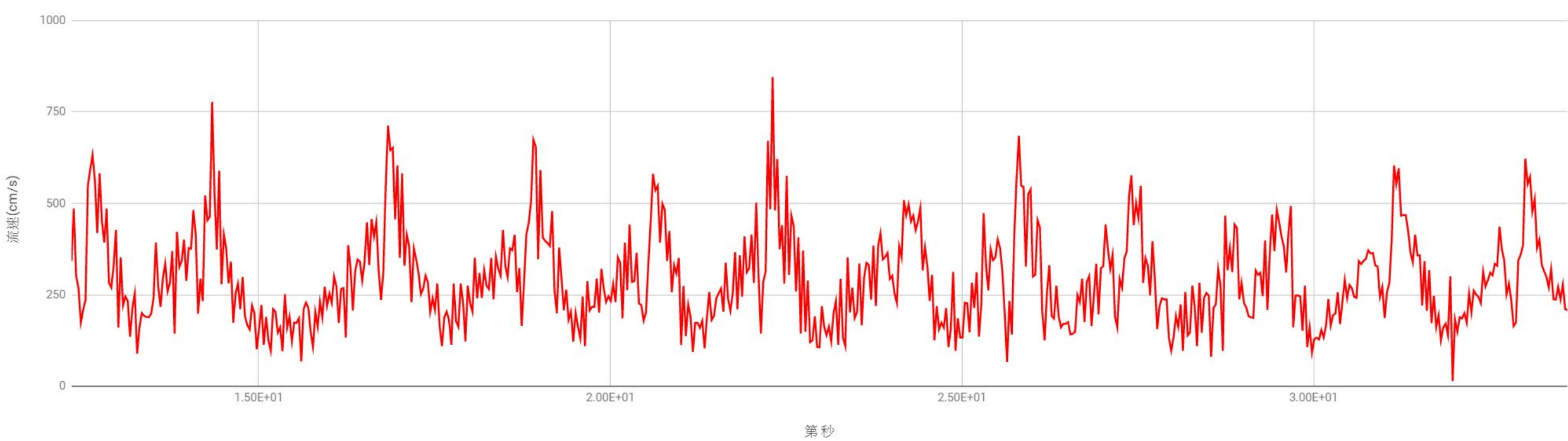


圖十五、高頻率時中心區與邊緣區流動之流速比較

(二)、分析單一頻率下不同渦流的流速變化，發現其越向內圈速率越慢，且在每一圈都有之快慢的不同。而每圈最快之處為中心向外之處(白色箭頭為較快，藍色箭頭為流向)。

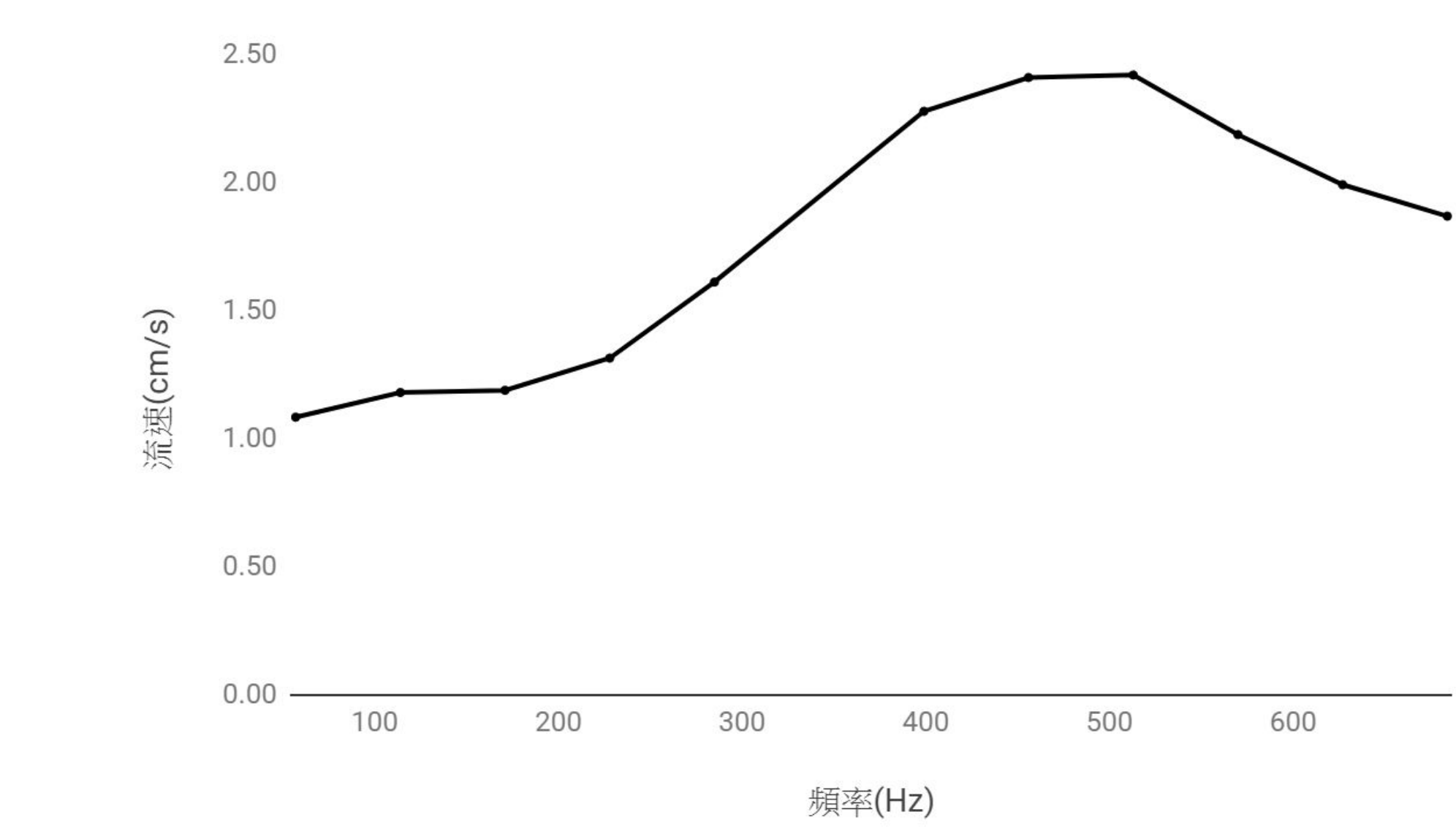


圖十六、單一渦流流向圖及渦流位置示意圖

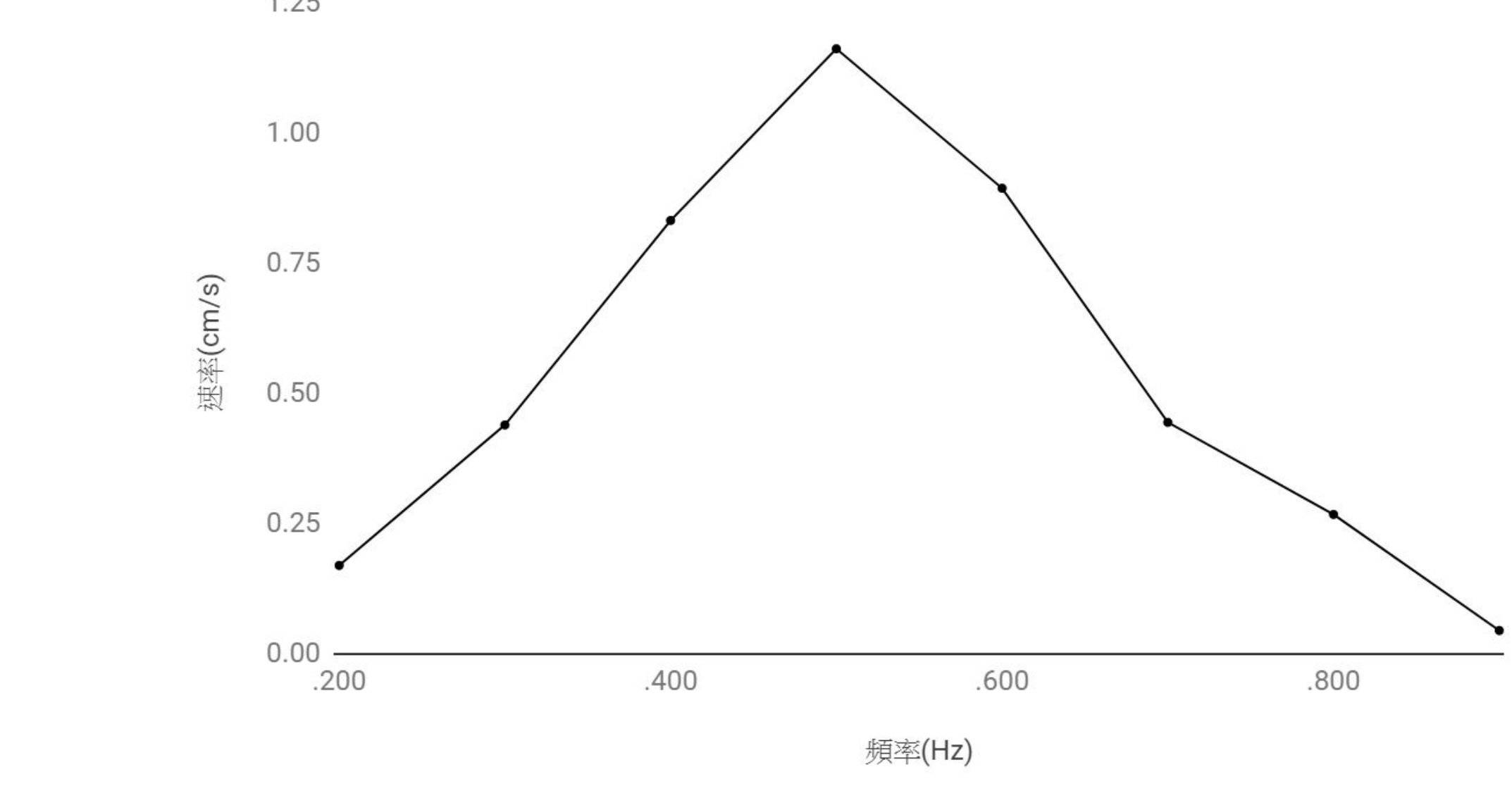


圖十七、單一頻率不同渦流流速變化

(三)、57Hz(共振頻率)倍頻及非共振頻率觀察皂膜流速之比較



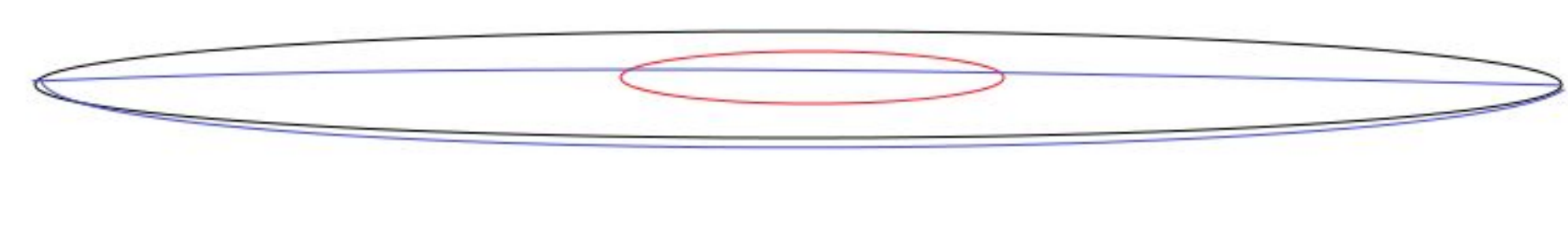
圖十八、57倍頻(共振頻率)流速變化圖



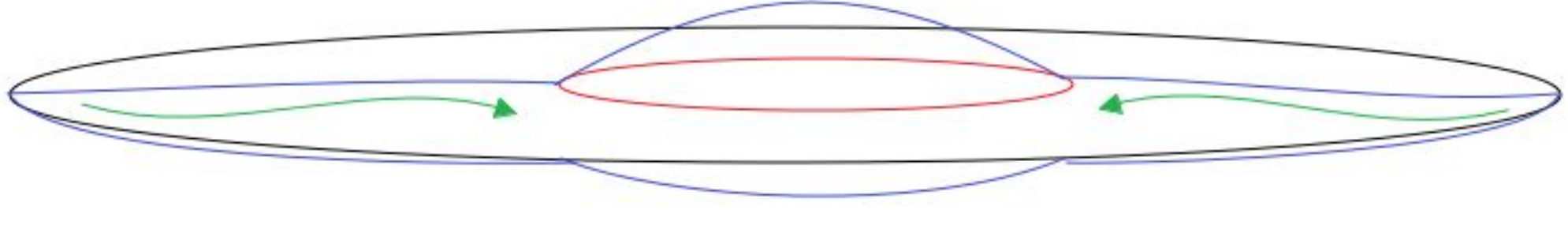
圖十九、高頻率流速變化圖

伍、討論

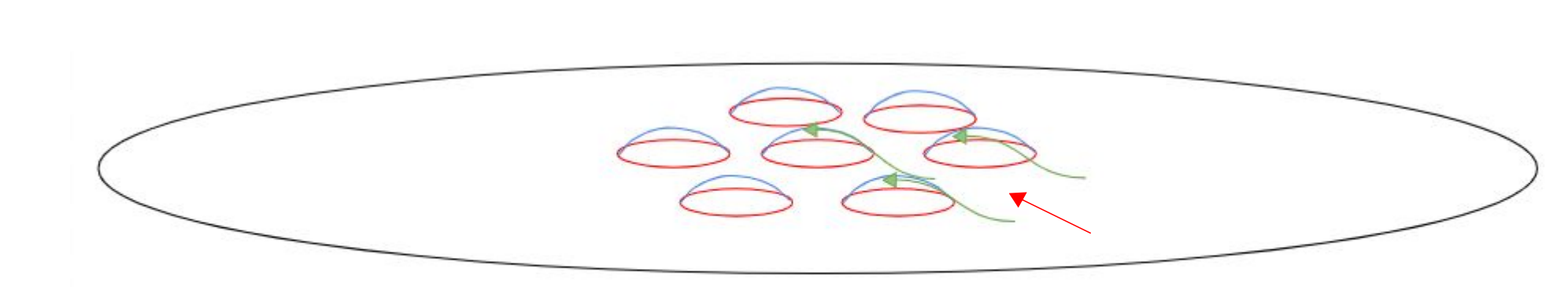
- 一、共振頻率使其產生穩定振動波紋，而趨近穩定的啟動態和不穩定態展現了皂膜的自我適應性
- 二、低頻率時振盪使皂膜受慣性力影響，腹點較厚。以皂膜的顏色與厚度可得證。
- 。



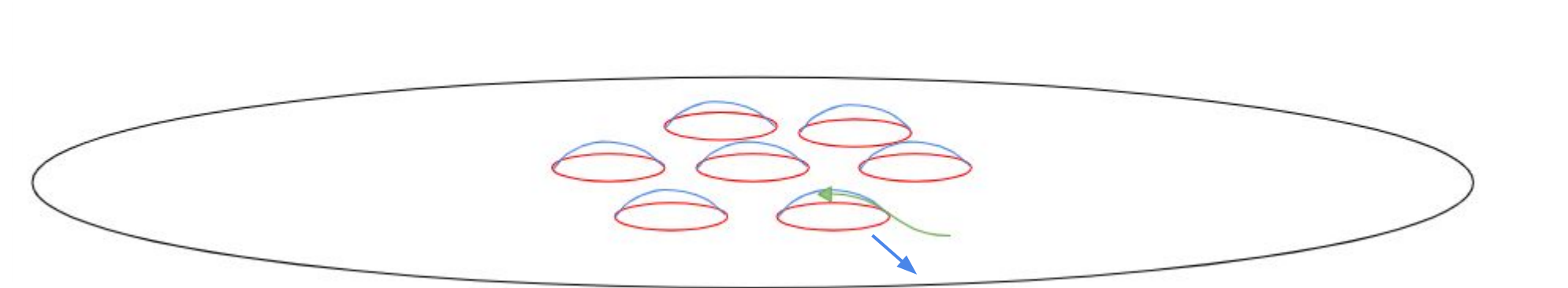
圖二十、啟動聲波前皂膜為均厚



圖二十一、啟動聲波後，中心區因高速振動而瞬間變厚

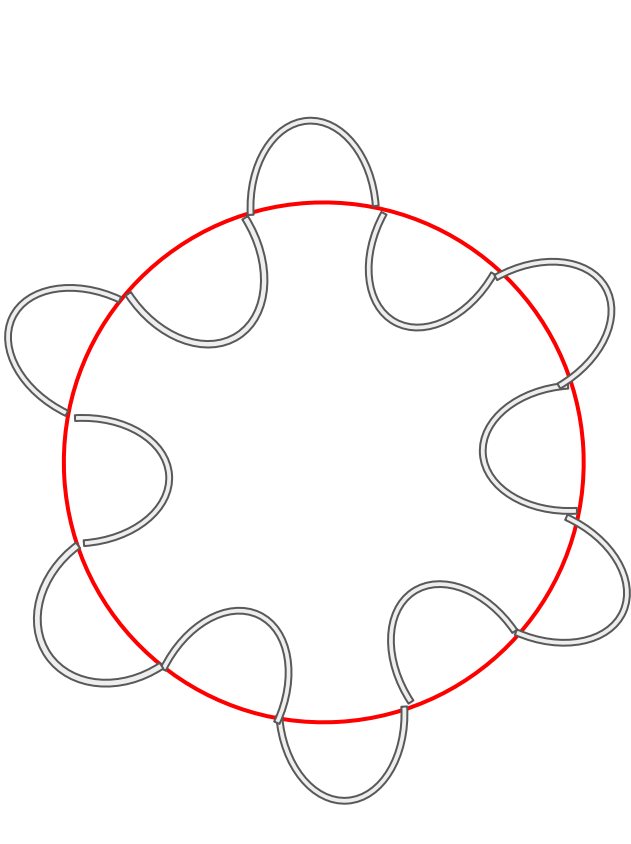


圖二十二、受三腹點影響故慣性力拉扯較大，皂水向中心流



圖二十三、僅受一腹點影響，表面張力大於慣性力，故皂水向邊框流

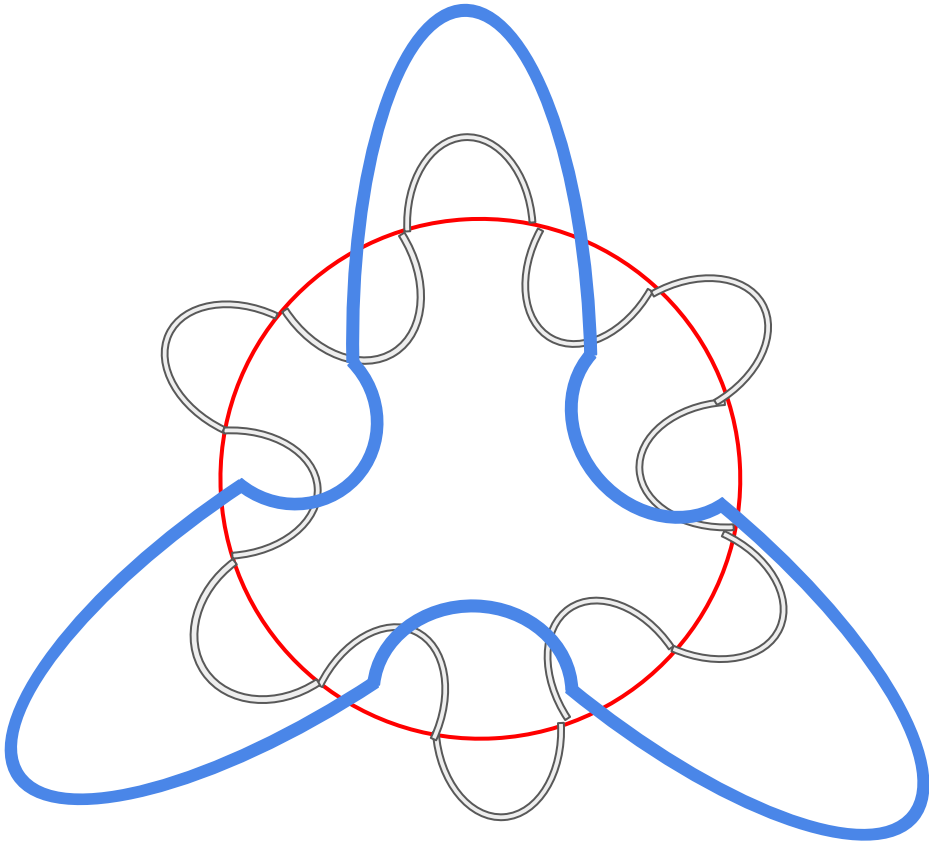
三、影響皂膜之聲波由層層圓駐波組成，當聲音頻率增加時，波長變短，而圓駐波也會縮小，而使得影響皂膜中心區域之圓駐波改變。



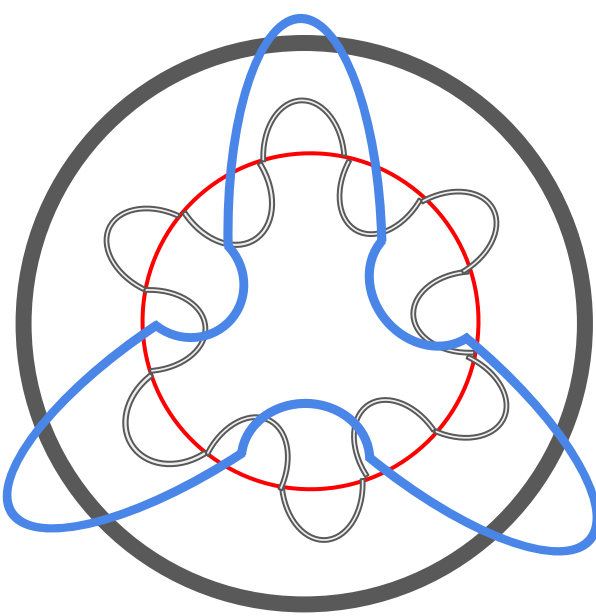
圖二十五、第一圈圓駐波



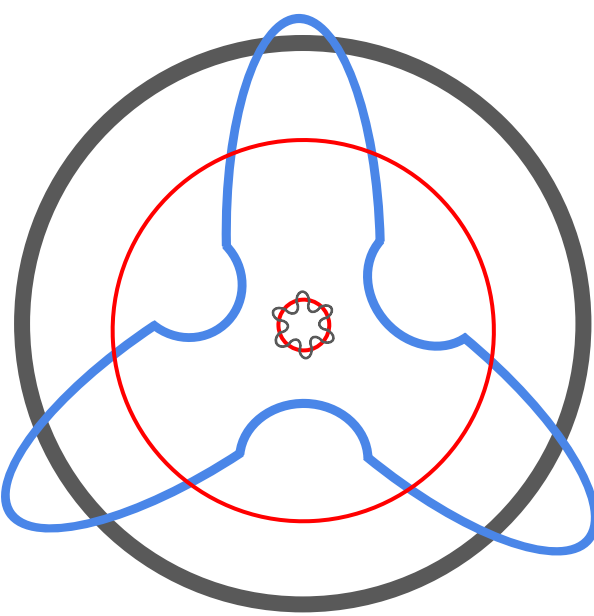
圖二十六、第二圈圓駐波



圖二十七、組成之圖形



圖二十八、低頻時的圓駐波



圖二十九、高頻時圓駐波

四、頻率越高，皂膜越薄，振動速度越快使得中心區和邊緣區相互推移流動的速率也越快，到了500 Hz左右時，由於到達了皂膜的臨界值，因此速率便開始下降。而渦流的流動主要由中心腹點振盪為驅動力。

陸、結論

- 一、皂膜的自我適應性使其在共振頻率與非共振頻率分別產生穩定態與非穩定態。
- 二、由於頻率越高，波長越短，使共振頻率之倍頻的中心區面積會逐漸縮小。
- 三、中心區的振動慣性力會使腹點增厚，達到飽和時皂水會從腹點向上和向下排出。
- 四、受聲波影響而形成之中心區會因振動慣性力汲取邊緣區皂水而變厚，邊緣區則變薄。到高頻時則由中間排水至外圍，使皂膜變薄。
- 五、由顏色與厚度比較證明皂膜厚度受振動影響。
- 六、受振動影響之皂膜受到吸力與推力，會產生渦漩狀之流動，且一個渦漩不同位置流速會不同。
- 七、當頻率增加，皂膜水平流速因皂膜振動頻率增加而加速，在到達極限值時便開始下降。

捌、參考資料

- 一、Bubble film with vortex。2016 年臺灣國際科學展覽會大會獎四等獎。作者章本新、黃諺恩。指導教師:張良肇、馮愛蓮。
- 二、膜上的波扭。中華民國第49屆中小學科學展覽會。作者呂伊庭、鄭惟允、洪家琪。指導老師:吳原旭、林慶豪
- 三、馬拉高尼效應與肥皂泡接近之機制。作者：袁苙芸、蕭佩宛。市立惠文高中。指導老師：張小琪。